



Filipe Vieira de Almeida

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Análise de aperto por indentação na maquinaria com vista
ao cumprimento de tolerâncias geométricas –
Um caso de estudo industrial**

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT-UNL

Coorientador: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira
Martins, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Manuel Vicente Fradinho,
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Arguentes: Engenheiro Nuno Alexandre de Carvalho Guerin, Engenheiro Mecânico -
Responsável Técnico pelo Desenvolvimento de Produto da Hanon Systems;

Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva, Professor Auxiliar
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa;

Vogal: Professor Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT-UNL



setembro de 2019

Análise de aperto por indentação na maquinação com vista ao cumprimento de tolerâncias geométricas – um caso de estudo industrial.

Copyright © Filipe Vieira de Almeida, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“Failure is the opportunity to begin again more intelligently.”

Henry Ford

Agradecimentos

Quero começar por agradecer ao meu Orientador, Professor Doutor António Mourão, por me ter dado a oportunidade de realizar esta dissertação e ter depositado confiança no meu trabalho. Gostaria também de agradecer por toda a ajuda concedida, pelo empenho, pelas longas reuniões, sempre com boa disposição, e pelo auxílio prestado perante todas as dúvidas e problemas que tive.

De igual modo, quero agradecer ao meu Coorientador, Professor Doutor Rui Martins por todo o empenho, orientação e ajuda. Encontrou sempre forma de me auxiliar e resolver os meus problemas, sem nunca rejeitar qualquer pedido que fiz à sua porta.

Gostaria de agradecer, também, ao Engenheiro Nuno Guerin por ter me permitido esta oportunidade e ter reconhecido a importância da realização destes trabalhos. De igual modo, quero agradecer ao Engenheiro Fábio Albuquerque por toda a disponibilidade e prontidão em fornecer todas as informações necessárias para a realização deste estudo, demonstrou estar sempre disponível para discutir e transmitir conhecimento.

Gostaria de agradecer à minha amiga e namorada, Inês Neves, por toda a ajuda, paciência e segurança que me permitiram superar todos os obstáculos, ao longo dos últimos cinco anos.

Quero, também, agradecer aos meus colegas e amigos Manuel Madeira e Tiago Pratas pelo companheirismo e ajuda que sempre disponibilizaram.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer à minha família por ter permitido e fornecido todos os meios para a minha formatura, enquanto Engenheiro Mecânico.

Resumo

Na maquinação de peças com espessura fina, as deformações produzidas pela aplicação de forças no respetivo aperto são tanto mais críticas quanto mais elevado é o grau de precisão requerido nas tolerâncias.

O objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de uma metodologia que permita prever as deformações induzidas pelo sistema de aperto utilizado num processo de fabrico de uma empresa do ramo automóvel. Pretende-se também averiguar o impacto das deformações induzidas no cumprimento das tolerâncias especificadas no projeto. Realizou-se um estudo de caso de um componente de um compressor, designado por *Orbiting Scroll*. No caso em estudo, a peça é presa na bucha de aperto através de pontos de indentação nos grampos.

A empresa pretende reduzir os desvios em peças produzidas através da melhoria das operações de aperto das peças que produz. Para o efeito, disponibilizou relatórios de medição de tolerâncias dimensionais e geométricas e os desenhos técnicos desta peça.

Estimou-se a força de indentação aplicada, por cada um dos três grampos do sistema de aperto, na superfície da espiral da peça e, através de um software de simulação de elementos finitos, foi simulada a condição de aperto a que a peça é submetida. Comparou-se os resultados da simulação com os dados fornecidos nos relatórios e verificou-se a compatibilidade entre estes, o que permitiu assumir a metodologia desenvolvida como adequada. Por fim, foram simuladas novas configurações para o sistema de aperto, no sentido de reduzir as deformações impostas na peça, tendo sido encontradas duas soluções para o efeito.

Com esta dissertação, demonstrou-se a importância da aplicação deste tipo de metodologias na fase de preparação da produção de componentes.

Palavras-chave: aperto para maquinação, deformações, simulação do aperto, tolerâncias geométricas.

Abstract

When machining thin parts, the deformations produced by the application of forces by the respective clamping system are more critical when the required degree of precision of the tolerances is more demanding.

The objective of this thesis is the development of a methodology for predicting deformations caused by a clamping system, used in a manufacturing process of an automotive industry, to accomplish the specified tolerances design. It was performed a case study on a compressor component, Orbiting Scroll. In this case, the workpiece is fixed by the clamping system by indentation points on the clamps.

The company intends to reduce deviations produced in parts by improving the clamping operations. To this end, it was provided dimensional and geometric tolerance measurement reports and the technical drawings of this workpiece.

The indentation force applied on the surface of the part, by each clamp of the clamping system, was estimated and the clamping condition was simulated, through a finite element software. The simulation results were compared with the data provided in the reports and their similarity was verified, regarding deformation, this allowed to assume the developed methodology as adequate. Finally, new configurations for the clamping system were simulated to reduce the deformations imposed on the workpiece and two solutions was found for the purpose.

With this thesis, the importance and utility of these kind of methodology in the preparation work is demonstrated.

Key words: clamping to manufacture, deformation, clamping simulation, geometric tolerances.

Índice Geral

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice Geral	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Siglas e Acrónimos	xix
Simbologia	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da Dissertação	5
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Sistemas de Aperto Giratório	7
2.2 Parâmetros Críticos em Sistemas de Aperto	8
2.3 Estudos de Otimização de Sistemas de Aperto	10
3 Caso de Estudo	19
3.1 Introdução	19

3.2	Sobre o funcionamento do Compressor <i>Scroll</i>	19
3.3	Peça de Estudo - <i>Orbiting Scroll</i>	21
3.4	Operações de Maquinação	25
3.5	Configuração dos Sistemas de Aperto Utilizados	28
4	Análise de Dados da Medição	33
4.1	Introdução.....	33
4.2	Tolerâncias de paralelismo.....	35
4.3	Parâmetro “ <i>Z Value Points</i> ”	37
4.4	Algumas conclusões.....	39
5	Estudo do Sistema de Aperto da OP10.....	41
5.1	Introdução.....	41
5.2	Metodologia Aplicada	42
5.3	Determinação da Força de Indentação aplicada	43
5.4	Simulação da condição de Aperto.....	45
6	Alteração da Condição de Aperto	63
6.1	Introdução.....	63
6.2	Alteração da Profundidade de Indentação	64
6.3	Alteração da Localização das zonas de aperto.....	66
7	Nova Solução de Aperto para a OP10	71
8	Conclusão e Trabalhos Futuros	75
8.1	Conclusão.....	75
8.2	Trabalhos Futuros.....	78
	Bibliografia	81
	Anexos	85

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Componentes de uma bucha de aperto, com grampos independentes ajustáveis (ROHM, 2014).	7
Figura 2.2 - Esquema sobre a importância do controlo dos parâmetros críticos.	9
Figura 2.3 - Perfis de um anel desde a forma original até à forma final, após maquinação (Estrems <i>et al.</i> , 2015).	11
Figura 2.4 – Representação em perspetiva do grampo de aperto com extensómetro para medir a força de aperto exercida na peça, adaptado de Georgiadis <i>et al.</i> (2014)...	12
Figura 2.5 - Montagem experimental de sistema de aperto com extensómetros,	12
Figura 2.6 - Influência da força de aperto na geometria final de uma peça em produção, adaptado de Knape <i>et al.</i> (2019).	13
Figura 2.7 – Representação em perspetiva de duas buchas hidráulicas com 3 e 6 grampos (Patalas <i>et al.</i> , 2018).	14
Figura 2.8 - Buchas hidráulicas de 3 e 6 grampos a realizar o aperto sobre o anel de espessura fina (Patalas <i>et al.</i> , 2018).	14
Figura 2.9 - Deformação causada pelo aperto para os casos da bucha hidráulica com três grampos e com seis grampos (Patalas <i>et al.</i> , 2018).....	15

Figura 2.10 - Forças e momentos aplicados numa bucha para aperto com três grampos (Estrems <i>et al.</i> , 2017).....	16
Figura 2.11 - Montagem experimental com o objetivo de medir e relacionar a força de aperto com o momento de aperto Estrems, <i>et al.</i> (2017).....	16
Figura 2.12 - Efeito da interação entre a ferramenta e a peça com parede de espessura fina (Sun & Jiang, 2018).....	17
Figura 3.1 - Representação do encaixe entre a <i>Fixed Scroll</i> e a <i>Orbiting Scroll</i> , adaptado de Carrier, 2004.	20
Figura 3.2 – Funcionamento de um Compressor <i>Scroll</i> , adaptado de Northwest Equipment Ltd. (2015).....	21
Figura 4.1 - Tolerâncias geométricas de “Paralelismo Fundo” e de “Paralelismo Topo”.	34
Figura 4.2 - Parâmetro “Z Value Points”	34
Figura 4.3 – Tolerâncias de paralelismo, referente ao Anexo I.	35
Figura 4.4 - Pontos de verificação de diferença de cotas entre fundos (legenda: a) planta; b) perspectiva).....	38
Figura 4.5 - Vista em corte do componente em estudo, com as cotas nominais avaliadas.	38
Figura 5.1 - Teste de Brinell (ISO, 2014).	42
Figura 5.2 - Princípio do método de Rockwell com uma esfera de aço (Broitman, 2017).	44
Figura 5.3 - Condição de fronteira de fixação da peça para simulação de condição de aperto.....	47
Figura 5.4 - Localização e geometria das zonas de indentação.....	48

Figura 5.5 – Ponto de medição do deslocamento para a análise de convergência.....	49
Figura 5.6 - Malha de elementos finitos utilizada na simulação da condição de aperto.	49
Figura 5.7 - Representação dos resultados gráficos relativos à tensão de Von Mises. ...	51
Figura 5.8 - Representação gráfica dos deslocamentos ao longo da superfície da peça.	52
Figura 5.9 - Ponto de deslocamento máximo, relativo aos deslocamentos resultantes..	52
Figura 5.11 - Pontos de interesse para medição do deslocamento (plano xz).	53
Figura 5.12 - Deformação triangular da peça em estudo, segundo a direção do eixo vertical (plano xz).	54
Figura 5.13 - Deslocamento máximo imposto na peça segundo a direção do eixo Y.....	54
Figura 5.14 - Comparação gráfica de resultados obtidos pela CMM e através da simulação.	57
Figura 5.15 - Pontos de interesse para medição do deslocamento na base, na direção de y.....	58
Figura 5.16 - Apresentação das superfícies de referência, de fundo e de topo na peça sem e com deformação.....	59
Figura 5.17 - Comparação gráfica entre critérios “Paralelismo Fundo” e “Paralelismo Topo”	60
Figura 6.1 - Deslocamentos impostos nos dez pontos de interesse com a alteração da profundidade de indentação.....	65
Figura 6.2 - Magnitude de deslocamentos medidos segundo a direção Y, através da rotação das áreas de aperto de um ângulo de 30° no sentido dos ponteiros do relógio.....	67

Figura 6.3 - Magnitude de deslocamentos para uma rotação da localização das zonas de aperto num ângulo de 260° no sentido contrário aos ponteiros do relógio.	68
Figura 7.1 - Bucha de aperto manual JN06, da <i>Kitagawa</i>	71
Figura 7.2 - Grampo de aperto da série JN da <i>Kitagawa</i> , com ampliação na zona do indentador.....	72
Figura 7.3 - Operação de aperto na bucha manual.	72
Figura 7.4 - Localização da zona de aperto.....	73
Figura 7.5 - Marca deixada pelo sistema de aperto com indentador geometria em pirâmide.....	73

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Composição química da liga de alumínio.....	23
Tabela 3.2 – Propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio.....	23
Tabela 3.3 - Sequência de maquinação da OP10.....	26
Tabela 3.4 - Sequência de maquinação da OP20.....	27
Tabela 4.1 - Valores de desvio, relativos ao paralelismo de fundo, registados nos componentes respetivos aos onze relatórios analisados	36
Tabela 4.2 - Valores de desvio, relativos ao paralelismo da superfície do topo da espiral, registados nos componentes respetivos aos onze relatórios analisados.....	37
Tabela 4.3 - Valores relativos aos “Z Value Points” registados nos 10 pontos analisados.....	39
Tabela 5.1 - Análise de convergência da malha de elementos finitos.	49
Tabela 5.2 - Análise da variação aquando da geração da malha de elementos finitos no nó número 22244.	50

Tabela 5.3 - Deslocamento medido na simulação nos pontos de interesse segundo a direção de y.	53
Tabela 5.4 - Comparação dos deslocamentos (valores em módulo) entre simulação e dados	56
Tabela 5.5 - Deslocamentos medidos no modelo computacional na superfície de fundo da base.	58
Tabela 5.6 - Comparação numérica entre critérios “Paralelismo Fundo” e “Paralelismo Topo”	60
Tabela 6.1 - Valores da força de indentação face à diminuição da profundidade de indentação.	64
Tabela 6.2 - Medição dos deslocamentos impostos nos dez pontos de interesse com a alteração da profundidade de indentação.....	65

Siglas e Acrónimos

CAD – *Computer Aided Design* (Desenho assistido por computador).

CMM – *Coordinate Measuring Machine* (Máquina de medição de coordenadas).

HBW – Dureza Brinell.

HRB – Dureza Rockwell da escala B.

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

MEF – Método dos Elementos Finitos.

OP10 – Operação dez.

OP20 – Operação vinte.

Simbologia

A_c - Área projetada ou de contacto.

F_I – Força de indentação.

h – Dimensão linear do elemento triangular.

H_I – Dureza de indentação.

r – Raio da circunferência.

1 Introdução

1.1 Contextualização

O desenvolvimento tecnológico verificado nas últimas décadas conduziu ao crescimento da indústria, nomeadamente, através da introdução de soluções inovadoras, que permitiram responder às necessidades do mercado atual. Contudo, esta inovação levou ao aparecimento de soluções, em alguns casos, mais complexas, o que teve como consequência o aparecimento inevitável de novos problemas. Nos dias de hoje, um dos principais ofícios de um engenheiro é encontrar soluções inovadoras e de baixo custo para a resolução destas questões, relacionadas sobretudo com a sofisticação dos produtos e dos seus processos de fabrico.

Assiste-se, também, na indústria mecânica, a um aumento do interesse, por parte das empresas, em adotar metodologias de melhoria contínua e engenharia simultânea. Esta vontade surge da necessidade das empresas garantirem competitividade, através da utilização dos seus recursos de forma efetiva e rentável no longo-prazo. Sendo reconhecido, por parte das empresas e dos seus gestores, a importância da introdução e do desenvolvimento destas questões, de forma a acompanhar as constantes exigências do mercado. Portanto, são de

enorme relevância todos os estudos e trabalhos que sejam realizados com o intuito de melhorar processos existentes, ou de criar metodologias/abordagens de resolver problemas do dia-a-dia industrial.

Na indústria automível tem-se assistido a uma necessidade crescente de melhoria dos processos de fabrico e de montagem, relacionados com o aumento do grau de precisão requerido aos fabricantes de componentes. Este incremento da precisão requerida criou a necessidade de diminuir erros de fabrico, associados à interpretação de desenhos de engenharia que têm impacto na funcionalidade dos sistemas mecânicos. A utilização do toleranciamento geométrico, em conjunto com o toleranciamento dimensional, permite colmatar dúvidas relacionadas com especificações de projeto, particularmente na montagem entre peças. A utilização adequada desta ferramenta de projeto, de produção e de qualidade permite, além de reduzir erros na produção, garantir a interpretação uniforme dos desenhos e reduzir os tempos de produção, bem como os custos associados (A. Mourão, 2004).

Na maquinação de componentes mecânicos, um dos aspetos com maior importância, é a utilização de máquinas-ferramenta e de sistemas de fixação adequados para cada situação. No caso dos sistemas de fixação, a utilização da configuração de aperto adequada, contribui, de forma significativa, para o cumprimento das especificações de projeto, nomeadamente das tolerâncias.

1.2 Motivação

Num processo de maquinação de componentes mecânicos, um dos problemas relevantes está relacionado com o sistema de fixação, nomeadamente, com as deformações produzidas pela aplicação de forças de aperto ou através da utilização de uma configuração do sistema de aperto inadequada. Estas questões são ainda mais críticas quando é necessário cumprir tolerâncias com elevado

grau de precisão, nomeadamente no caso de peças com espessura fina que possuem menos rigidez. Teoricamente num aperto numa bucha, a redução das forças de aperto permite menores deformações e, portanto, cumprir tolerâncias de fabrico mais apertadas. Contudo, esta alteração reduz, também, a força de atrito exercida pelos grampos de aperto, aumentando o risco de escorregamento da peça. Assim, torna-se relevante contemplar todas as variáveis envolvidas num sistema de aperto, com o objetivo de garantir que são cumpridas as especificações de projeto e que a segurança da operação não é posta em causa. Neste trabalho procurou-se relacionar as forças de aperto aplicadas pelos grampos na peça com a deformação que a peça sofre, pois verificou-se noutros estudos que a força exercida pelos elementos de aperto tem uma elevada importância no grau de precisão do processo de fabrico.

Esta dissertação foi realizada no contexto de uma empresa multinacional fornecedora da indústria automóvel. A empresa procura ser líder em soluções inovadoras, e tem procurado melhorar os seus processos de fabrico. Neste sentido, foi estudado o sistema de aperto utilizado na maquinação de um componente de um compressor de ar condicionado do tipo *scroll*, cuja ação tem elevada importância no funcionamento do compressor. O problema em estudo está relacionado com as deformações que a peça sofre por ação do aperto e a relação entre estas deformações e os desvios verificados nas peças produzidas pela empresa. Embora as deformações sejam reduzidas (na ordem dos micrómetros), podem estar diretamente relacionadas com o incumprimento de tolerâncias dimensionais e geométricas especificadas no projeto, pelo que não se pode desprezar o seu efeito no que se refere ao grau de precisão do processo de fabrico. Deste modo, procurou-se, também, encontrar soluções para otimizar o desempenho da configuração do sistema de aperto utilizado pela empresa, no sentido de satisfazer um dos seus principais objetivos da empresa, no que concerne à melhoria dos seus processos de fabrico, particularmente no caso dos sistemas de fixação.

Este trabalho permite, ainda, realçar a importância do projeto e da preparação do trabalho no cumprimento dos requisitos funcionais, essencialmente, no que diz respeito ao fabrico, à montagem, à qualidade e aos respetivos custos associados. A resolução deste tipo de problemas requer conhecimento técnico e tecnológico, que só é possível através da cooperação em simultâneo entre os vários

departamentos da empresa, com especial ênfase para o Projeto, a Produção, a Engenharia (Preparação do trabalho) e a Qualidade. Esta forma integrada de organizar e planejar o trabalho para o desenvolvimento de produtos designa-se por Engenharia Simultânea.

1.3 Objetivos

Tendo por base as motivações apresentadas para a realização desta dissertação, um dos principais objetivos é estudar aprofundadamente os sistemas de aperto giratório, no que se refere às deformações verificadas nas peças e ao incumprimento de requisitos de projeto.

Neste sentido, pretende-se analisar os parâmetros envolvidos numa operação de aperto, bem como perceber de que forma se pode melhorar a configuração de um sistema de fixação, no caso específico de uma bucha de aperto. Através desta análise pretende-se que sejam estimados os esforços exercidos pelos grampos de aperto sobre a peça no momento do aperto, uma vez que este é realizado por meio de um indentador com geometria cônica e que efetua uma indentação significativa na peça.

A determinação da força exercida na indentação tem como objetivo efetuar a simulação da condição de aperto através de um *software* de elementos finitos, o *SolidWorks Simulation* 2018, no sentido de comparar os resultados da simulação relativamente às deformações produzidas na peça com os relatórios de medição de tolerâncias dimensionais e geométricas, elaborados pelo Departamento da Qualidade da empresa, obtidos através de uma máquina de medição de coordenadas (CMM). Através desta comparação pretende-se averiguar se existe relação entre as deformações observadas no componente em estudo e o sistema de aperto utilizado.

Por fim, procurou-se alterar alguns parâmetros envolvidos no aperto, com o objetivo de encontrar novas configurações para o sistema de fixação que permitam reduzir as deformações a que a peça está a ser submetida e, deste modo,

cumprir os requisitos de projeto, no que concerne às tolerâncias geométricas descritas nos desenhos técnicos.

Assim, resumidamente, esta dissertação tem como objetivos:

- Recolher dados relativos às tolerâncias de projeto, através de relatórios fornecidos pela empresa;
- Estimar a força de aperto exercida por cada grampo;
- Relacionar a deformação verificada na peça com os esforços resultantes do sistema de aperto;
- Encontrar soluções que permitam reduzir as deformações e cumprir as tolerâncias especificadas;
- Realçar a importância de metodologias de melhoria dos processos de fabrico.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em oito capítulos e nove anexos, que são abaixo sucintamente descritos.

No capítulo 1 é descrito o tema da dissertação e são descritas as motivações que levaram à realização deste estudo, bem como, os objetivos que se pretendem alcançar.

No capítulo 2 apresentam-se conteúdos provenientes do estudo bibliográfico realizado, sendo abordados os sistemas de aperto giratório, os parâmetros críticos envolvidos na definição de um sistema de aperto e, por fim, são apresentados alguns estudos realizados sobre a temática de otimização da configuração de sistemas de aperto.

No capítulo 3 referem-se alguns conceitos associados ao funcionamento de um compressor do tipo *scroll*, apresenta-se a peça em estudo, descrevem-se algumas propriedades do material desta peça, apresentam-se as operações de maquinação da peça e os sistemas de aperto utilizados.

No capítulo 4 são analisados os relatórios de medição de tolerâncias dimensionais e geométricas, elaborados pelo Departamento da Qualidade da empresa,

sendo avaliado, em pormenor, os parâmetros referentes ao “Paralelismo Fundo”, “Paralelismo Topo” e “*Z Value Points*”.

No capítulo 5 é estimada a força de indentação a que a peça é submetida por cada um dos grampos, sendo descrita a metodologia utilizada. Neste capítulo é realizada, ainda, a simulação da condição de aperto, recorrendo ao Método dos Elementos Finitos (MEF).

No capítulo 6 são apresentadas algumas soluções de alteração da condição de aperto, relativamente à profundidade de indentação e à localização das zonas de aperto.

No capítulo 7 é apresentada a nova configuração do sistema de aperto utilizado atualmente pela empresa.

No capítulo 8 são descritas todas as conclusões obtidas com a realização desta dissertação e apresentam-se algumas sugestões e considerações sobre trabalhos futuros.

Por fim, são disponibilizados nove anexos, com informações adicionais, que se encontram devidamente referenciadas ao longo do texto desta dissertação e que permitem complementar os assuntos abordados.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sistemas de Aperto Giratório

Existem diferentes tipos de sistemas para apertos giratórios, tais como, bucha de aperto, aperto magnético e sistemas com ponto, pinça ou mandril (Cabrita, 2016). Contudo, apenas se considera relevante, no âmbito da presente dissertação, a apresentação das buchas de aperto, mais utilizadas em operações de torneamento.

Estes sistemas de aperto são compostos, normalmente, por uma grande variedade de componentes, como apresentado na Figura 2.1, a título de exemplo.

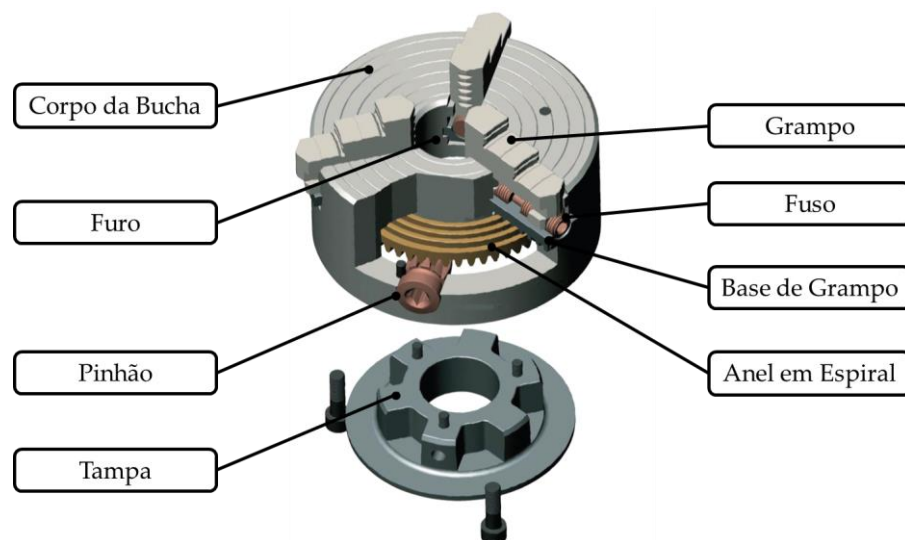


Figura 2.1 - Componentes de uma bucha de aperto, com grampas independentes ajustáveis (ROHM, 2014).

Este tipo de sistema de aperto é normalmente aplicável em peças com forma circular e comprimento reduzido. Existem diferentes tipos de buchas de aperto, sendo que os pontos chave para a escolha do sistema de aperto mais adequado são (Cabrita, 2016):

- Diâmetro da peça;
- Força de aperto;
- Velocidade de rotação;
- Número de grampos;
- Grampos independentes ou centrantes;
- Grampos com aperto: interior, exterior ou reversível;
- Grau de precisão;
- Tipo de atuação: manual, hidráulica ou pneumática;
- Com ou sem furo passante.

2.2 Parâmetros Críticos em Sistemas de Aperto

Um sistema de aperto robusto, sob condições dinâmicas de maquinação, isto é, forças e momentos que variam ao longo da superfície de uma peça durante uma operação de maquinação, deve assegurar (Meyer & Liou, 2010):

- Constrangimento total da peça ao longo de todo o período da operação;
- Controlo das forças de aperto;
- Posicionamento determinístico, ou seja, apenas uma posição e uma orientação do sistema de aperto garantem o contacto da peça com os elementos localizadores do sistema de aperto, durante toda a operação;
- Sequência de aperto adequada, grampos devem ser aplicados numa ordem tal que não cause o escorregamento entre a peça e os elementos de localização;
- Controlo do processo, sem influência de forças externas.

O controlo dos parâmetros referidos, durante uma operação de maquinação, é um aspeto fundamental para minimizar os desvios na peça. Permite, ainda, garantir a precisão da operação de maquinação e o cumprimento das dimensões e tolerâncias especificadas (Figura 2.2).

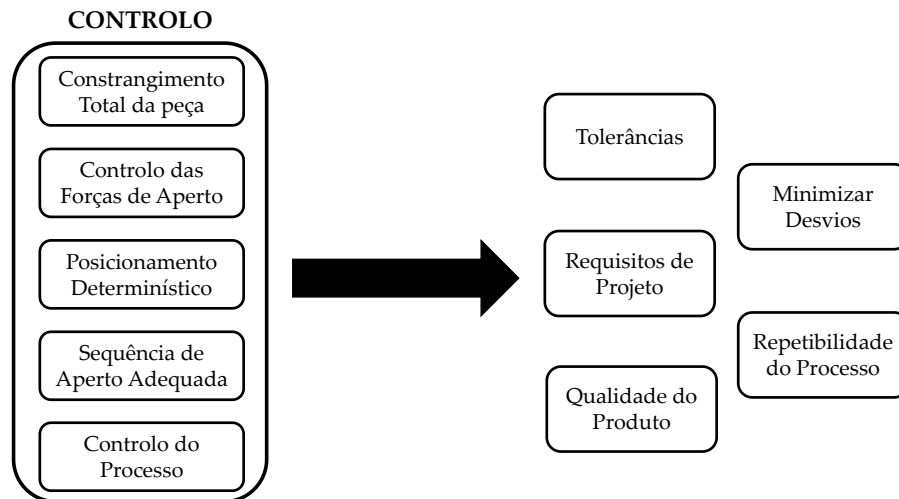


Figura 2.2 - Esquema sobre a importância do controlo dos parâmetros críticos.

A escolha dos pontos de aperto, a determinação da sequência de aperto adequada e o cálculo da força de aperto são fatores que, segundo Cioat & Kiss (2017), influenciam a precisão da operação de maquinação. Pelo que a sua determinação deve ser realizada tendo em conta as situações mais desfavoráveis para a operação de maquinação da peça. Desta forma é assegurada a rigidez do conjunto peça e sistema de aperto, garantindo o contacto entre os grampos e a peça, durante toda a operação de maquinação, e reduzindo, ou até eliminando, a existência de vibrações. No caso dos sistemas de aperto com bucha, a rigidez do sistema de aperto influencia significativamente a precisão da maquinação, uma vez que uma baixa rigidez pode originar desvios de circularidade na peça em fabrico, devido à variação inevitável da força de corte ao longo do tempo de maquinação (Wang, *et al.*, 2015).

Na indústria metalomecânica existem vários casos em que é necessário que determinados componentes possuam formas complexas e espessuras finas, com o objetivo de melhorar o seu desempenho. De acordo com Patalas, *et al.* (2018), o

aparecimento de deformações em peças com espessura fina está normalmente associado aos seguintes fatores: força de aperto e número de grampos de aperto. Para minimizar as deformações é importante minimizar a força de aperto, garantindo o cumprimento das tolerâncias geométricas, e determinar o número de grampos a utilizar, uma vez que os grampos vão influenciar significativamente a magnitude e a uniformidade da deformação da peça maquinada.

No caso de um anel com espessura fina, o cumprimento das tolerâncias apertadas, nomeadamente da tolerância geométrica de circularidade, é um aspeto crítico. O controlo da força de aperto, identificado como um parâmetro crítico na deformação de componentes com espessura fina, pode ser feito através da estimação do intervalo de valores admissíveis. Os valores máximo e mínimo da força de apertação obtidos de modo a não causar deformação na peça e a prevenir a ocorrência de acidentes em resultado do escorregamento desta durante o processo de maquinação, resultado da diminuição do coeficiente de atrito existente entre os grampos de aperto e as superfícies de aperto da peça.

O aparecimento de vibrações em operações de fresagem, nomeadamente no contacto da fresa com a peça pode diminuir consideravelmente a precisão e a eficiência da operação. Assim, devido à baixa rigidez da peça e às características dinâmicas da operação, é de elevada importância obter as condições que permitam garantir o controlo do processo (Sun & Jiang, 2018).

2.3 Estudos de Otimização de Sistemas de Aperto

No âmbito do projeto e planeamento de sistemas de aperto, a localização dos elementos de aperto e os valores dos parâmetros envolvidos no aperto têm sido considerados conceitos centrais (Nategh & Parvaz, 2018). Assim, a otimização dos sistemas de aperto tem sido desenvolvida com base nestas características,

tendo sido realizado, nos últimos anos, alguns estudos teóricos e experimentais sobre esta temática.

Com o objetivo de poder estimar a deformação total em anéis torneados, Estrems, *et al.* (2015) desenvolveram um modelo que tem em conta a força de aperto em diferentes posições angulares da peça e as forças de corte, ao longo da operação. Realizaram-se testes de corte num torno e mediram-se os perfis resultantes, tendo em atenção os desvios relativos à tolerância geométrica de circularidade (Figura 2.3). Este tipo de estudo fornece informação essencial para introduzir em modelos de melhoria de desempenho, nomeadamente sobre:

- Desvios de forma;
- Variação da espessura, em caso de peças com espessura fina;
- Variação da força de aperto;
- Variação da força de corte

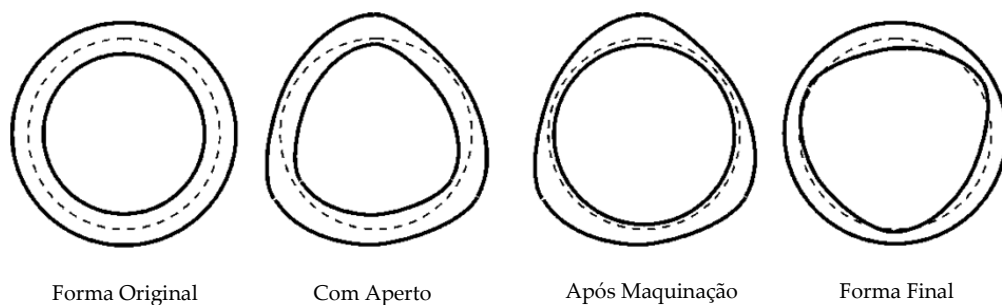


Figura 2.3 - Perfis de um anel desde a forma original até à forma final, após maquinação (Estrems *et al.*, 2015).

De forma similar, Georgiadis, *et al.* (2014) desenvolveram um sistema de fixação que permite medir as forças de aperto no decorrer do processo de maquinação de uma peça cilíndrica, com o objetivo de reduzir os desvios relativos à tolerância de circularidade da peça. A medição é efetuada nos quatro grampos de aperto, através da inclusão de um extensómetro em cada um dos grampos de aperto, permitindo medir a força de aperto exercida no momento de contacto com a peça (Figura 2.4).

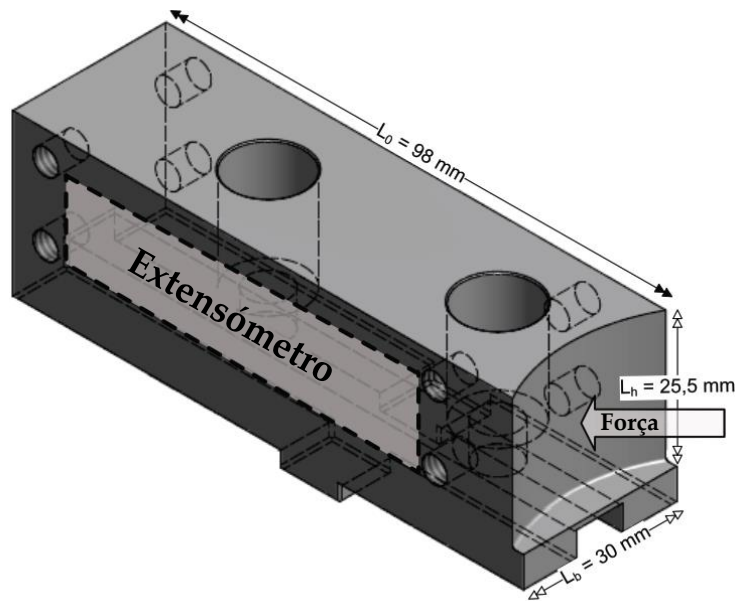


Figura 2.4 – Representação em perspectiva do grampo de aperto com extensômetro para medir a força de aperto exercida na peça, adaptado de Georgiadis *et al.* (2014).

Através da montagem experimental apresentada na Figura 2.5, os autores registraram os valores dos deslocamentos e das forças de aperto aplicadas por cada um dos grampos, tendo concluído que os desvios verificados na peça cilíndrica se devem ao grampo A, uma vez que este apresenta valores de deslocamento e força de aperto inferiores aos restantes grampos. Assim, os autores propõem, como solução, a implementação de um *software* capaz de controlar automaticamente o sistema de aperto durante a operação de maquinação, de forma a controlar o processo com o objetivo de reduzir os desvios de circularidade na peça.

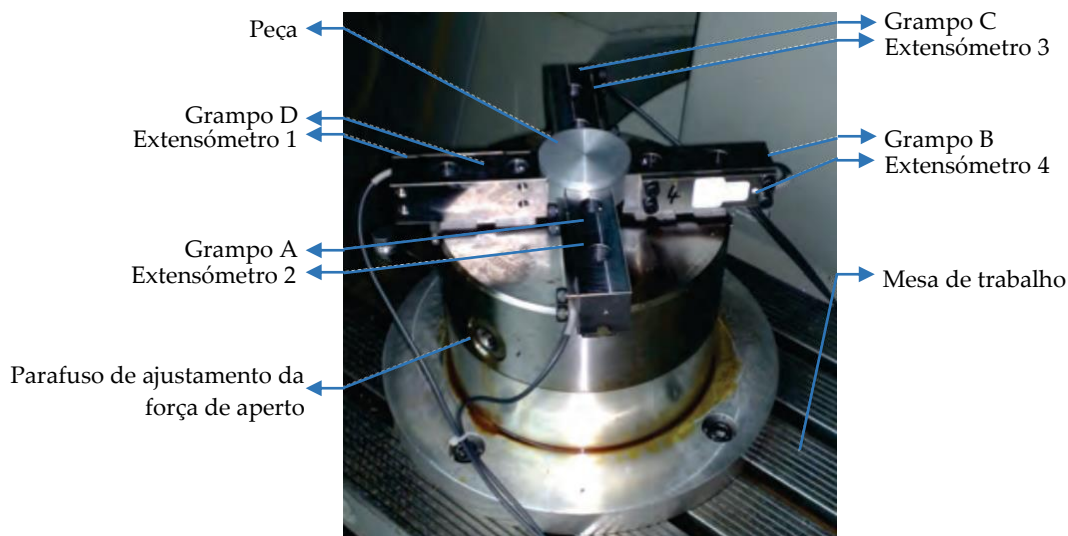


Figura 2.5 - Montagem experimental de sistema de aperto com extensômetros, adaptado de de Georgiadis *et al.* (2014)

Na fase de planeamento do fabrico, a simulação do processo apresenta um elevado potencial, pois permite verificar e validar novas soluções ou novos parâmetros. Estes programas possibilitam, também, reduzir custos inerentes ao desenvolvimento de um elevado número de protótipos experimentais, que podem ser realizados virtualmente, através de métodos computacionais. Neste sentido, Knape, *et al.* (2019) propõem um método para simular a influência da força de aperto durante o processo de maquinação. O método elaborado tem por base um modelo de elementos finitos, que utiliza dados reais de metrologia. Os autores mostraram a influência da força de aperto na geometria final da peça, com o objetivo de melhorar a precisão do processo de maquinação e prever a geometria final da peça produzida. Neste estudo foi considerado que numa operação de fresa-gem, a aplicação de uma força de aperto demasiado elevada provoca a deformação da peça no sistema de aperto, o que fará com que a peça seja maquinada numa configuração deformada. Como consequência, após a finalização do processo de maquinação, no momento de desaperto, a peça sofre o fenómeno de recuperação elástica, apresentando uma geometria final diferente da pretendida (Figura 2.6).

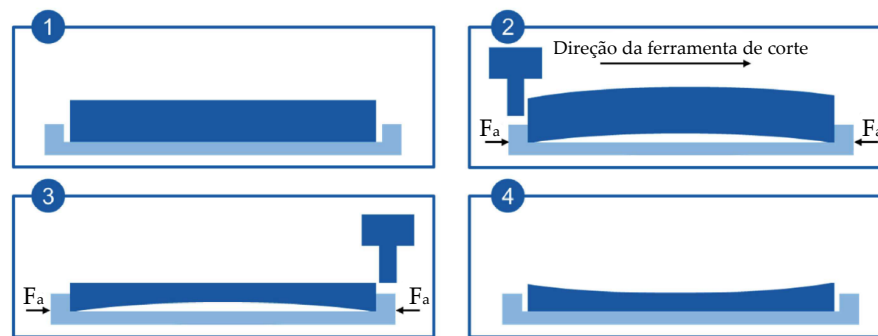


Figura 2.6 - Influência da força de aperto na geometria final de uma peça em produção, adaptado de Knape *et al.* (2019).

A introdução da informação relativa à geometria da peça num programa computacional de simulação por elementos finitos, permitiu prever com maior precisão a geometria final da peça, depois de maquinada. Deste modo, é possível prever, com base na geometria inicial de uma peça, qual a sua geometria final depois de realizada a operação de maquinação e estimar, com maior precisão, a

força de aperto a aplicar, permitindo prever a ocorrência do fenómeno de recuperação elástica da peça, em consequência do aperto realizado na peça (Knape et al., 2019).

Com cariz mais prático, Patalas *et al.* (2018) estudaram a influência das forças de aperto e de corte na deformação de peças com espessura fina numa bucha de aperto durante uma operação de acabamento. Contudo, a força de corte foi desprezada na simulação, visto que se trata de uma operação de acabamento, na qual esta grandeza apresenta um valor reduzido, quando comparado com o valor da força de aperto, não influenciando significativamente a deformação na peça. Neste estudo foi comparada a deformação causada pela força de aperto nos casos de uma bucha hidráulica de 3 grampos e de uma bucha hidráulica de 6 grampos (Figura 2.7). Os autores estimaram a deformação causada pelo aperto através de um *software* de elementos finitos (ANSYS). Nas simulações, foi utilizada uma malha mais refinada para o anel de espessura fina e uma malha mais grosseira para os grampos de aperto, como se observa na Figura 2.8, uma vez que o objetivo desta análise foi estimar a deformação na peça em consequência da força de aperto exercida pelos grampos, considerados elementos rígidos.

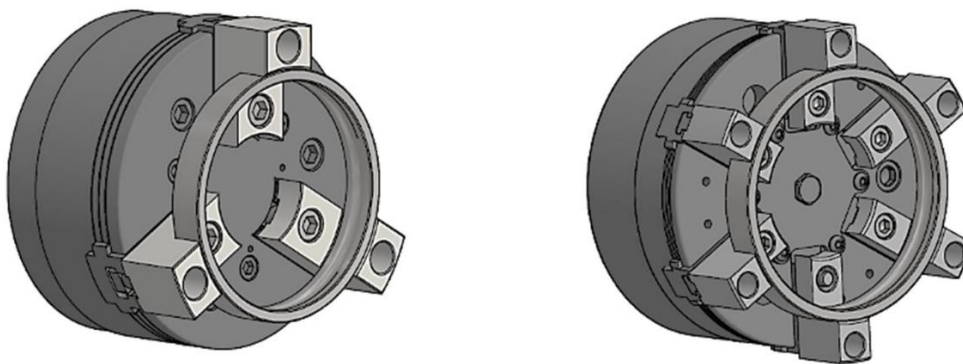


Figura 2.7 – Representação em perspectiva de duas buchas hidráulicas com 3 e 6 grampos (Patalas *et al.*, 2018).

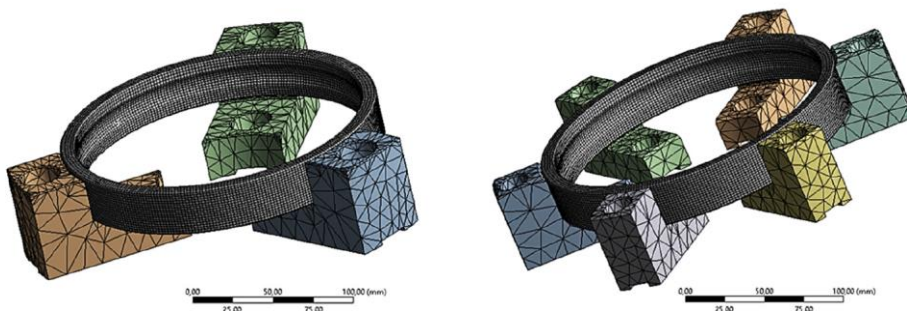


Figura 2.8 - Buchas hidráulicas de 3 e 6 grampos a realizar o aperto sobre o anel de espessura fina (Patalas *et al.*, 2018).

Como resultado verificou-se que a deformação é mais uniforme no caso do sistema de aperto com 6 grampos, como se observa na Figura 2.9, tendo-se obtido, para este caso, menores valores de deformação e melhor precisão de circularidade na peça. Com este método é possível estimar a força de aperto mínima requerida e o número de grampos requerido para minimizar a deformação da peça, e assim, melhorar a precisão da geometria final da peça maquinada.

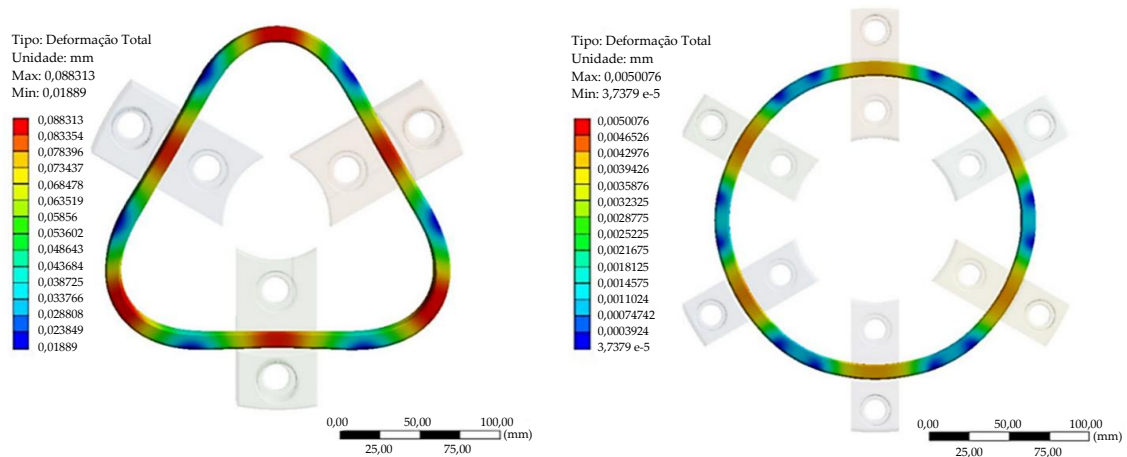


Figura 2.9 - Deformação causada pelo aperto para os casos da bucha hidráulica com três grampos e com seis grampos (Patalas *et al.*, 2018).

Num estudo realizado por Estrems *et al.* (2017), utilizou-se a teoria do contacto mecânico, com o objetivo de calcular o valor da força de aperto em função do momento aplicado no sistema da bucha de aperto. Esta teoria tem o propósito de estudar a deformação em consequência do contracto entre materiais sólidos, num ou mais pontos. Nesta análise foi determinado, ainda, o coeficiente de atrito real entre o grampo e a superfície de contacto da peça, por forma a obter o valor mínimo do momento de aperto necessário para impedir o escorregamento da peça, durante a operação de maquinação (Figura 2.10). Os autores concluíram que o coeficiente de atrito é um parâmetro que apresenta elevada relevância na determinação da força de aperto e do momento de aperto mínimos, permitindo prevenir a ocorrência de deformação por contacto.

Num outro estudo elaborado por Estrems, *et al.* (2017), foram estimados o momento de aperto e a força exercida por cada grampo sobre a superfície de um anel em aço. Este anel foi colocado num sistema de fixação constituído por uma bucha de aperto com quatro grampos. Efetuaram-se medições experimentais da

deformação e do momento de aperto, através de extensômetros colocados sobre a superfície da peça cilíndrica, com o objetivo de obter uma relação entre o momento de aperto e a força de aperto. Na Figura 2.11 observa-se a montagem experimental.

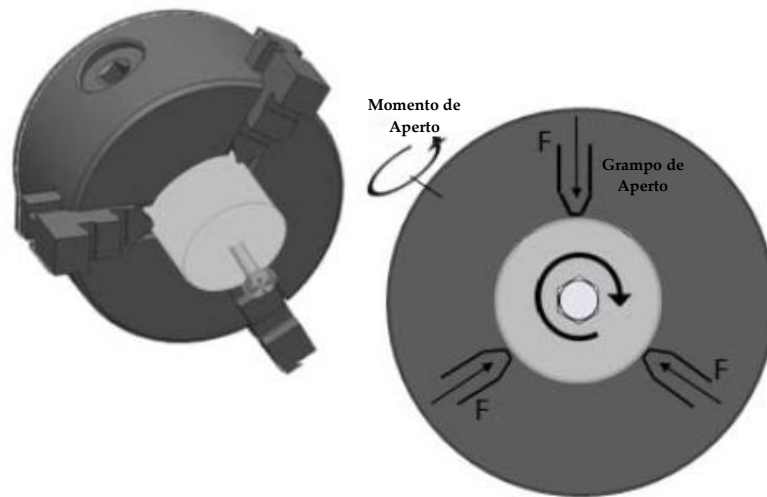


Figura 2.10 - Forças e momentos aplicados numa bucha para aperto com três grampos (Estrems *et al.*, 2017).

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com um modelo de elementos finitos. Os autores admitem existir uma relação entre a força de aperto e o momento de aperto, contudo não foi possível quantificar esta relação, sendo necessário realizar mais testes experimentais e simulações no sentido

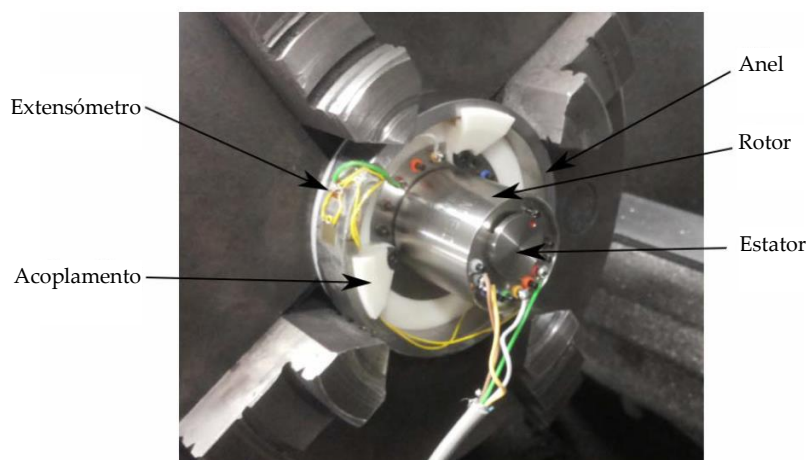


Figura 2.11 - Montagem experimental com o objetivo de medir e relacionar a força de aperto com o momento de aperto Estrems, *et al.* (2017).

de compreender melhor a relação entre a força de aperto e o momento aplicado no sistema de aperto.

Em operações de fresagem, nomeadamente na maquinação de peças com parede de espessura fina e com material com baixo módulo de elasticidade, ou seja, peças com baixa rigidez, pode ocorrer deformação por efeito da força de corte. Este fenómeno sucede devido à existência de vibrações causadas pelo contacto entre a ferramenta e a peça, aparecendo desvios na profundidade radial de corte e nos limites de ângulo de entrada da ferramenta, como se apresenta na Figura 2.12 (Sun & Jiang, 2018).

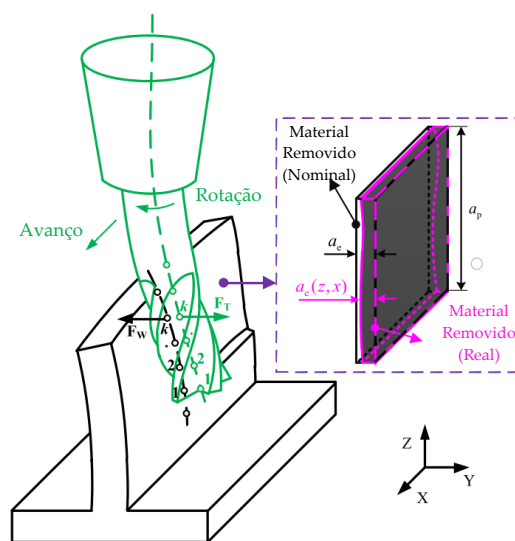


Figura 2.12 - Efeito da interação entre a ferramenta e a peça com parede de espessura fina (Sun & Jiang, 2018).

A presente dissertação foi elaborada na sequência de outra, intitulada como “Estudo do Aperto para Maquinação de Elevada Precisão – Caso da Espiral de um Compressor” da autoria do aluno Fábio Albuquerque (Albuquerque, 2018). Neste trabalho foram estimadas as forças de aperto e de corte envolvidas no processo de maquinação de um componente e efetuou-se a simulação por elementos finitos da condição de aperto, no sentido de estimar a influência destas grandezas na deformação final da peça. Nesta análise o autor comparou os resultados de uma simulação em que considerou a influência das forças de aperto e de corte com outra simulação onde apenas verificou o efeito da força de aperto na deformação da peça. Com este estudo, verificou-se que os resultados em ambas as análises são similares, o que permitiu concluir que a força de aperto tem uma

influência predominante na deformação final da peça. Assim, desprezou-se o efeito da força de corte, uma vez que esta força apresentava uma intensidade muito inferior à da força de aperto, tendo sido estimado que a força de corte tinha uma intensidade de 55 N e a força de aperto uma intensidade de 7757 N.

Assim, após a análise de vários artigos e estudos realizados no âmbito dos sistemas de aperto, de forma sintética, apresentam-se os conhecimentos adquiridos com maior relevância para o assunto em análise nesta dissertação.

- A magnitude e a orientação da força de aperto têm influência significativa na precisão da operação de maquinação;
- Na maior parte dos trabalhos e estudos de otimização é desprezado o efeito da força de corte dinâmica na deformação da peça;
- No que concerne à configuração do sistema de aperto, a posição, a orientação e o número de grampos de aperto são parâmetros com relevância para a precisão da operação.
- A simulação por elementos finitos é amplamente utilizada para verificar e validar metodologias desenvolvidas, no sentido de estimar deformações criadas durante a operação de maquinação.

Os conhecimentos adquiridos com esta revisão da literatura constituem uma base para o trabalho realizado nesta dissertação.

3 Caso de Estudo

3.1 Introdução

Nesta dissertação estudou-se as operações de maquinação referentes à produção de um componente de um compressor do tipo *scroll*, com o objetivo de analisar o sistema de aperto utilizado.

Os compressores *scroll* têm vindo a ser utilizados, sobretudo, em sistemas de ar condicionado e de refrigeração, para vários tipos de aplicações, nomeadamente em automóveis.

Neste capítulo são referidos alguns aspetos gerais sobre o funcionamento de um compressor do tipo *scroll*, analisou-se com maior pormenor a peça em estudo, foram descritas algumas especificações e propriedades do material utilizado no fabrico deste componente e por fim, analisou-se os sistemas de aperto utilizados nas operações de maquinação do componente em estudo.

3.2 Sobre o funcionamento do Compressor *Scroll*

O funcionamento de um compressor *scroll* assenta, sobretudo, em 2 peças em forma de espiral. Uma das peças em espiral é fixa e a outra orbita excentricamente em torno da fixa, no âmbito da linguagem utilizada na empresa, estas pe-

ças são geralmente designadas por *Fixed Scroll* e por *Orbiting Scroll*, respetivamente (Figura 3.1). A montagem destas peças é feita com estas rodadas de um ângulo de 180° entre si. Este aspeto é fundamental para o movimento contínuo de compressão do fluído aprisionado entre estes dois componentes forçando as bolsas de fluído criadas a deslocarem-se em direção ao centro do conjunto das peças (Carrier, 2004).

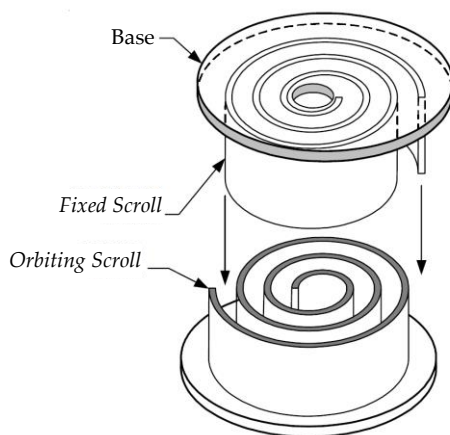


Figura 3.1 - Representação do encaixe entre a *Fixed Scroll* e a *Orbiting Scroll*, adaptado de Carrier, 2004.

Desta forma, reduz-se progressivamente o volume ocupado pelo fluído, fazendo aumentar a pressão de saída deste pela peça com forma de espiral fixa. Na Figura 3.2, encontra-se ilustrado o processo de funcionamento descrito, estando identificadas as zonas de admissão e expulsão do fluído, assim como o seu percurso até ser expulso na zona de descarga.

Durante este processo existem várias zonas de contacto entre estes dois componentes, o que implica que o processo de fabrico destas peças seja de elevada precisão. Assim, o projeto destes componentes está associado a tolerâncias apertadas, dado que quanto maior forem as folgas existentes menor é o rendimento do equipamento, devido a perdas durante o processo de compressão.

Este tipo de dispositivo apresenta algumas vantagens relativamente aos compressores rotativos mais tradicionais, nomeadamente relacionado com o processo de compressão que tem a característica de ser mais suave e contínuo, permitindo reduzir, ou mesmo, excluir a existência de vibração e ruído. Exibem, ainda, eficiência volumétrica na expulsão do fluído aprisionado, permitindo obter um rendimento de aproximadamente 100%. Uma das principais desvantagens deste

dispositivo é ser completamente hermético, dificultando a realização de operações de reparação ou de manutenção (Carrier, 2004).

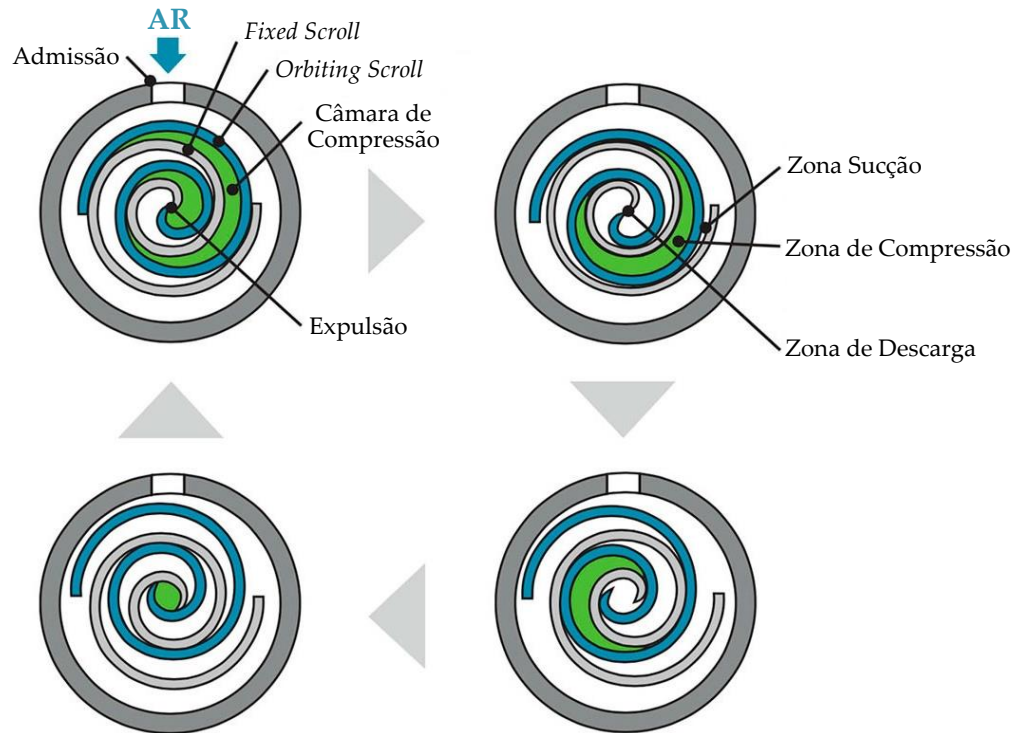


Figura 3.2 – Funcionamento de um Compressor *Scroll*, adaptado de Northwest Equipment Ltd. (2015).

3.3 Peça de Estudo - *Orbiting Scroll*

No que se refere ao estudo desenvolvido, a peça alvo de estudo denomina-se por *Orbiting Scroll*, como descrito anteriormente, é uma peça com a forma de uma espiral, que orbita excentricamente em torno de uma peça fixa (*Fixed Scroll*). Durante a realização da dissertação houve a necessidade de definir os dois lados da peça, tendo-se definido que o lado da peça com a espiral será designado por topo e o lado da peça oposto à espiral por base, como ilustrado na Figura 3.3.

A geometria da peça é conferida por um processo de forjamento (Figura 3.4), sendo depois maquinada através de operações de desbaste e acabamento no sentido de conferir à peça algumas características dimensionais e geométricas requeridas no desenho técnico desta peça, como apresentado na Figura 3.5.



Figura 3.3 - Definição das zonas do topo e da base da peça.

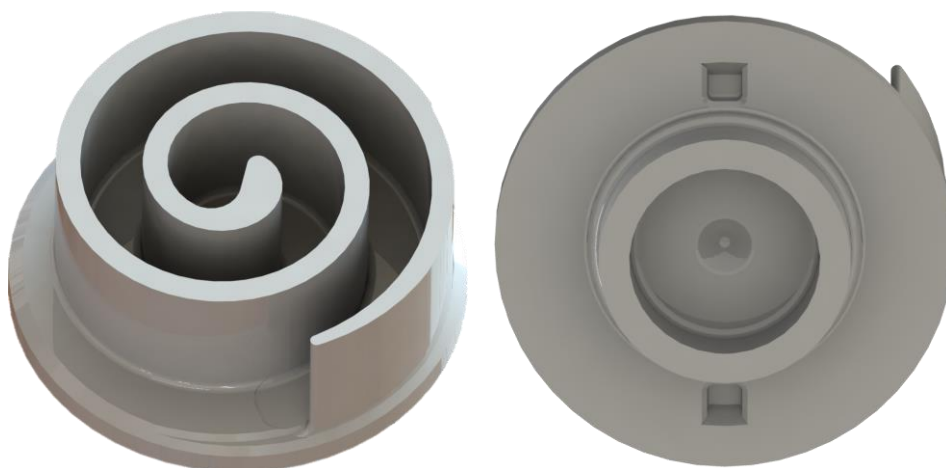


Figura 3.4 - *Orbiting Scroll*: geometria após processo de forjamento.



Figura 3.5 - *Orbiting Scroll*: geometria após processo de maquinagem.

A peça é produzida numa liga de alumínio para forjamento, cuja composição se encontra descrita na Tabela 3.1. Esta liga possui requisitos específicos, descritos na norma WSS-M2A159-A2, da *FORD GLOBAL TECHNOLOGIES*. Segundo os requisitos apresentados nesta norma, esta liga é produzida a frio e sujeita a um tratamento térmico T6, que permite aumentar a resistência da liga através de um processo que envolve três etapas solubilização, têmpera e envelhecimento artificial, normalmente aplicada em ligas de alumínio.

Tabela 3.1 - Composição química da liga de alumínio.

Composto	Peso (%)
Silício	9.0 – 11.0
Ferro	... - 0.5
Cobre	2.5 – 3.5
Manganês	... - 0.3
Titânio	... - 0.2
Zinco	... - 0.5
Magnésio	0.3 – 0.7
Outros	... - 0.2
Alumínio	Restante

Nesta norma encontram-se também descritas as propriedades físicas e mecânicas deste material, que se apresentam na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio.

Tensão de cedência	280 MPa
Tensão de rotura	360 MPa
Elongação	3%
Dureza	70 HRB
Peso específico	2.72 g/cm ³ (20 °C)
Módulo de elasticidade	79 MPa (20 °C)
Coefficiente de expansão térmica	20.0 x (10 ⁻⁶)/K (20 – 150 °C)

Relativamente ao desenho técnico deste componente (ver Anexo I), particularmente relacionado com o excerto apresentado na Figura 3.6, observou-se que as tolerâncias de paralelismo referentes à zona do topo têm como referência o *datum* E. Esta superfície de referência (*datum* E) tem duas tolerâncias geométricas associadas, uma de planeza, com o valor de 20 μm , e uma de paralelismo, com o valor de 300 μm , que têm como referência o *datum* A, superfície não maquinada proveniente do processo de forjamento. Na segunda operação (OP20), é realizada a maquinação desta superfície (*datum* A) e da superfície do topo da espiral (ver secção 3.4). Relativamente a estas superfícies existem tolerâncias de paralelismo especificadas no desenho, ambas com o valor de 20 μm , com referência à superfície de referência da zona da base da peça (*datum* E).

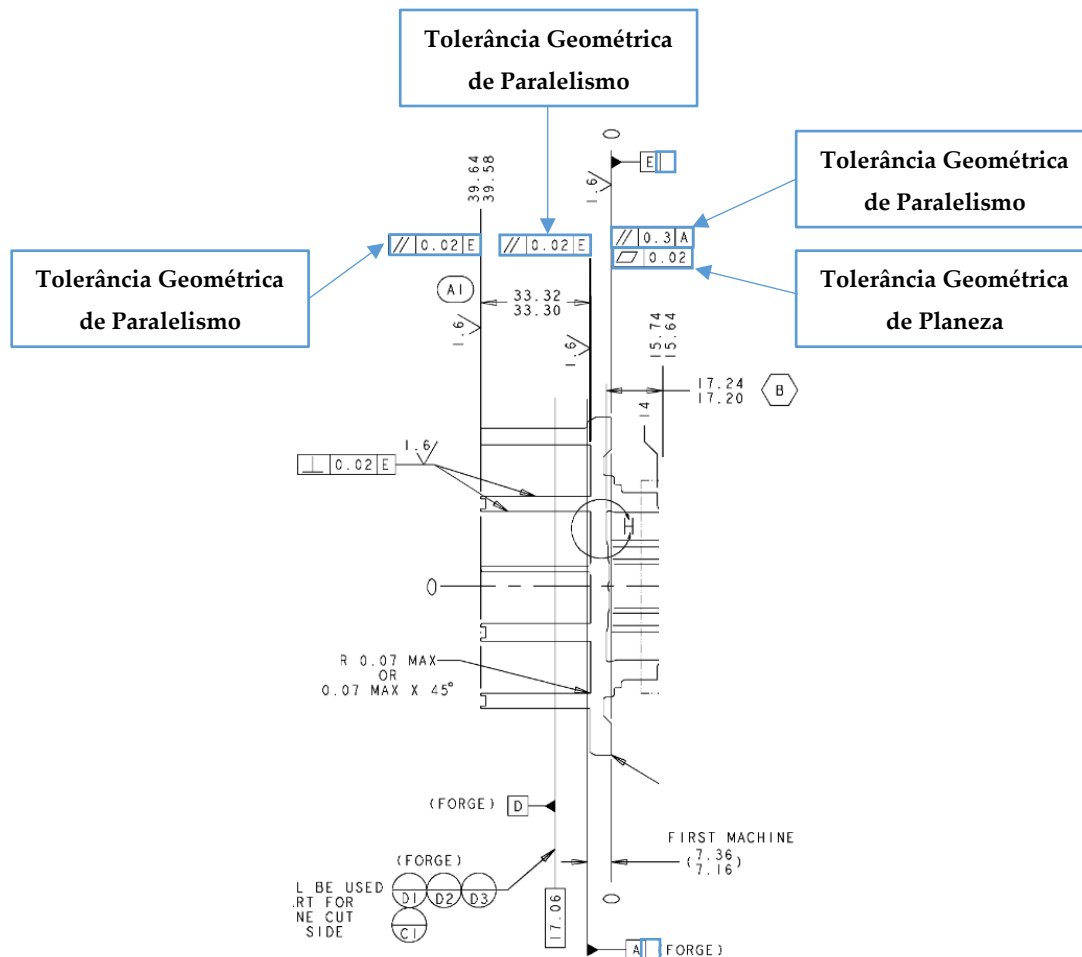


Figura 3.6 – Desenho técnico com tolerâncias geométricas relativas ao componente em estudo.

3.4 Operações de Maquinação

O processo de maquinação deste componente está dividido em duas operações. Numa primeira operação é maquinada a base, e na segunda operação é feita a maquinação do topo, sendo as operações designadas por operações dez (OP10) e vinte (OP20), respetivamente.

No que concerne à sequência de maquinação utilizada na primeira operação (OP10), esta é composta por duas operações de desbaste, interior e exterior (operações 1 e 2, respetivamente), duas operações de acabamento exterior e interior (operações 3 e 4, respetivamente), e uma operação final de acabamento para assegurar o cumprimento da tolerância geométrica de planeza (Figura 3.6). Na Tabela 3.3 encontra-se apresentada a sequência de operações com uma ilustração esquemática das superfícies maquinadas em cada uma das operações.

A sequência de maquinação na OP20 é constituída por duas operações realizadas ao topo da espiral e quatro operações realizadas nas zonas do fundo e da parede da espiral (duas de desbaste e duas de acabamento). A sequência de operações encontra-se apresentada na Tabela 3.4, com uma ilustração esquemática das superfícies maquinadas em cada uma das operações.

Tabela 3.3 - Sequência de maquinação da OP10.

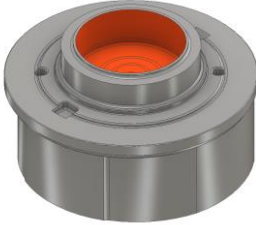
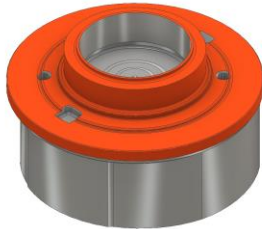
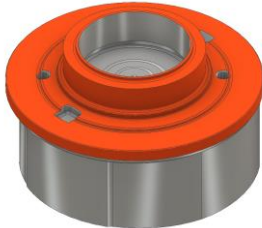
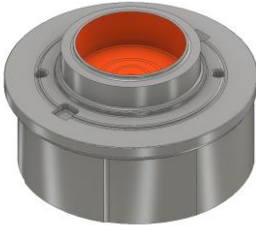
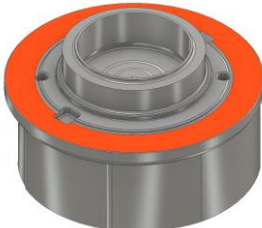
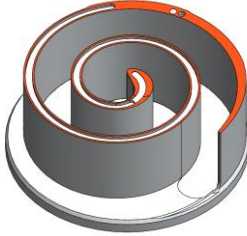


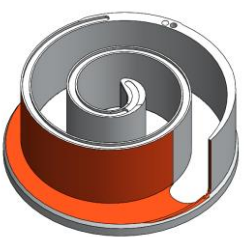


OP10 - Orbiting Scroll			
Nº Operação	Instrução	Ilustração esquemática	Tolerância geométrica requerida
1	Desbaste Interior		-
2	Desbaste Exterior (Torneamento)		-
3	Acabamento Exterior (Torneamento)		Paralelismo (datum A)
4	Acabamento Interior (Zona Caixa do Rolamento)		-
5	Acabamento (Datum E)		Planeza (datum E)

Tabela 3.4 - Sequência de maquinação da OP20.

OP20 - Orbiting Scroll			
Nº Operação	Instrução	Ilustração esquemática	Tolerância geométrica verificada
1	Maquinação do Topo da Espiral		-
2	Desbaste das Paredes e Fundo da Espiral (Zona Externa)		-
3	Desbaste das Paredes e Fundo da Espiral (Zona Interna)		-
4	Acabamento das Paredes e Fundo da Espiral (Zona Externa)		Paralelismo (<i>datum</i> E)
5	Acabamento das Paredes e Fundo da Espiral (Zona Interna)		Paralelismo (<i>datum</i> E)
6	Maquinação do Topo da Espiral		Paralelismo (<i>datum</i> E)

3.5 Configuração dos Sistemas de Aperto Utilizados

3.5.1 Primeira Operação (OP10)

No caso da operação OP10 de maquinação, o sistema de aperto é composto por uma bucha de aperto com 3 grampos espaçados de 120° , que realizando aperto por indentação de material da superfície da espiral da peça. Na Figura 3.7 está representado, esquematicamente, a localização das zonas de aperto, onde se realiza a indentação do material, com o objetivo de restringir o movimento da peça. Relativamente à localização da zona de aperto, particularmente da área de indentação, esta encontra-se distanciada de três milímetros do fundo da peça.

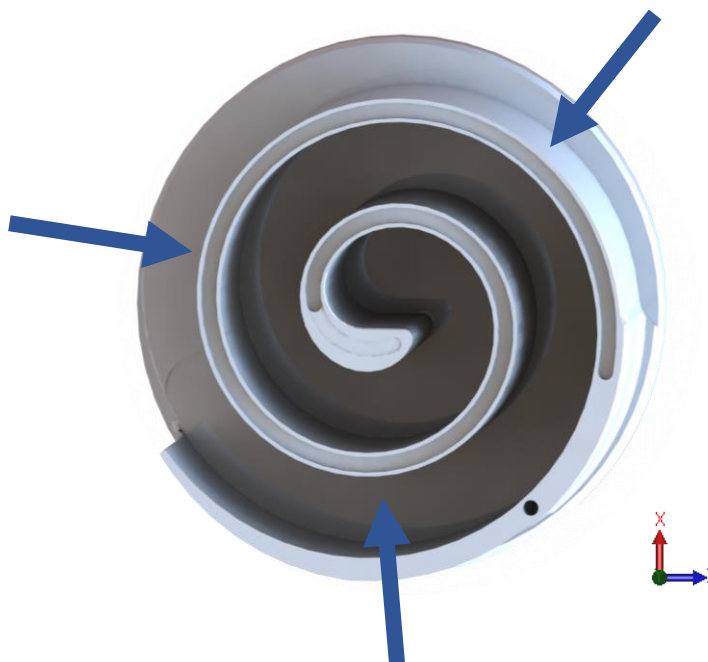


Figura 3.7 – Localização das três zonas de aperto da peça, para a operação OP10.

Os grampos utilizados neste sistema de aperto contactam com a superfície da peça através de um indentador (Figura 3.8), criando na peça uma marca com profundidade igual a um milímetro. O indentador apresenta geometria cônica com ponta esférica, de diâmetro igual a um milímetro. Para a profundidade de indentação referida, o diâmetro marcado no indentador, de geometria cônica, é igual a 2 milímetros, como ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.8 - Grampo de indentação utilizado na OP10, destaque para o indetador.

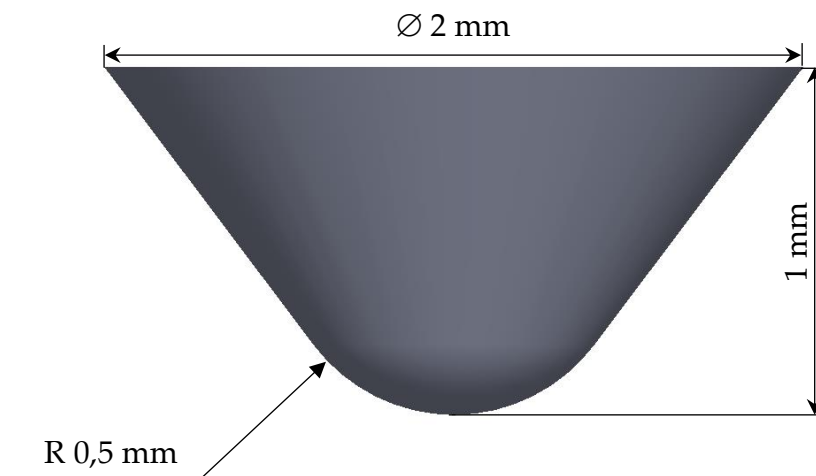


Figura 3.9 – Indentador com geometria cónica e ponta esférica.

O sistema de indentação atua na peça para que seja realizada a OP10, indentando o material nos pontos de aperto anteriormente referidos, que se encontram espaçados de 120°. Após o desaperto do sistema de indentação, a peça fica, na zona da superfície da espiral, com três marcas nos pontos de indentação facilmente visíveis, referentes às três áreas de aperto, como apresentado na Figura 3.10. Estas marcas foram analisadas, tendo-se verificado que a marca de indentação apresentada é equivalente a uma área circular com diâmetro igual a 2 mm, e uma profundidade de 1 mm.



Figura 3.10 – Marca de indentação.

Assim, torna-se relevante verificar se a deformação na superfície da peça, causada pelo sistema de aperto com indentação utilizado na primeira operação, está a influenciar o cumprimento das tolerâncias apertadas, requeridas no projeto do componente em estudo, o que será abordado nos capítulos 4 e 5.

3.5.2 Segunda Operação (OP20)

Na operação OP20 o aperto da peça é realizado pela superfície da zona da base, para que seja maquinada a zona da espiral da peça. Nesta operação é utilizada uma bucha de aperto pneumática com sistema de acionamento automático, com dez grampos de aperto, como apresentada na Figura 3.11.

A bucha utilizada pela empresa é produzida pelo fabricante *SCHUNK*. Este sistema de aperto contém um pino localizador, identificado na Figura 3.11 a amarelo, para que a peça em estudo seja colocada na bucha de aperto sempre na mesma posição, garantido a correta localização e orientação da peça no sistema de aperto. Na Figura 3.12 observa-se a posicionamento da peça a maquinar na OP20 na bucha de aperto.

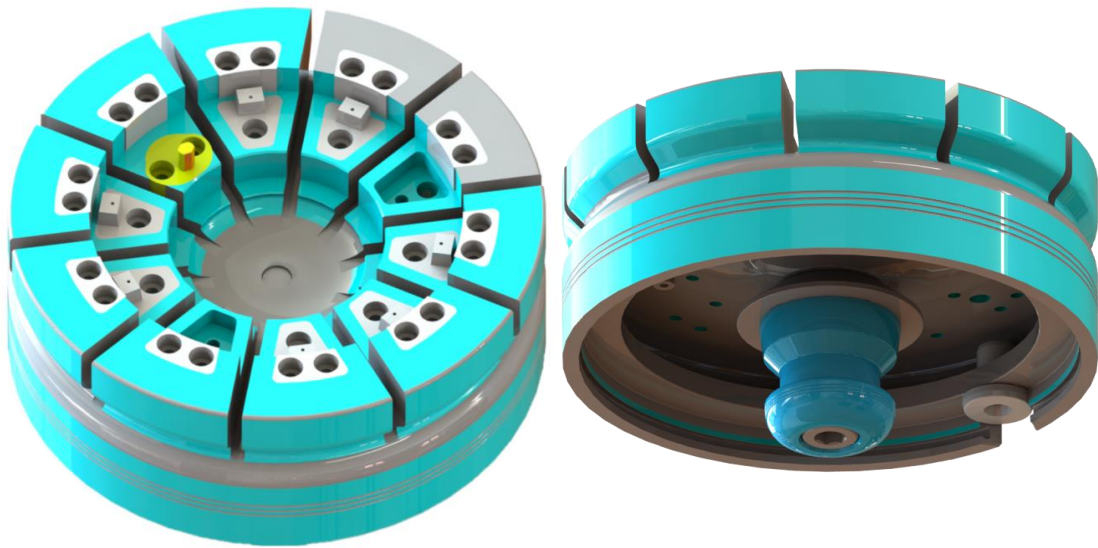


Figura 3.11 - Bucha de aperto utilizada na OP20, com pino localizador a amarelo.

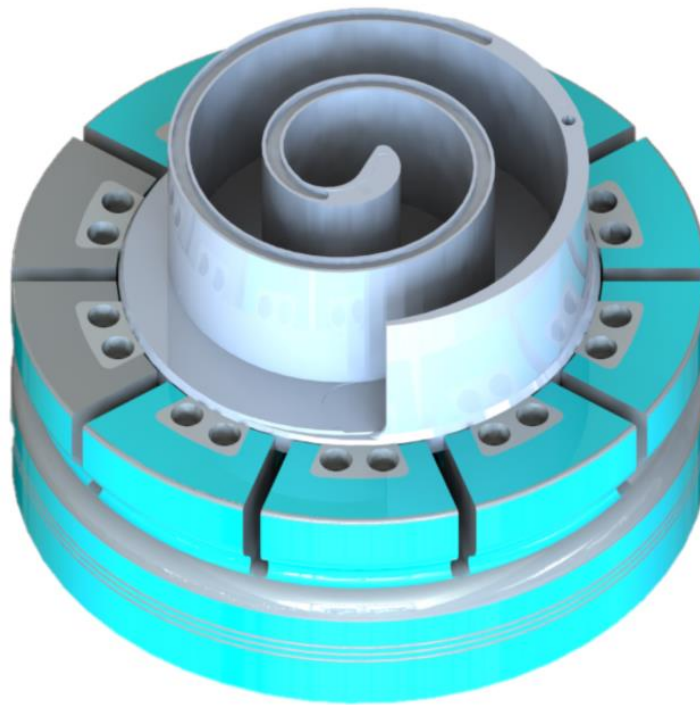


Figura 3.12 - Aperto utilizado para a operação OP20 de maquinação da espiral.

4 Análise de Dados da Medição

4.1 Introdução

Face ao caso de estudo apresentado no Capítulo 3, foi solicitado à empresa relatórios de medição de tolerâncias dimensionais e geométricas, elaborados pelo Departamento da Qualidade, referentes ao componente em estudo. Esta solicitação foi realizada com o objetivo de analisar e verificar os parâmetros e requisitos avaliados, de forma a perceber se os requisitos de projeto estão a ser respeitados, nomeadamente no que se refere ao cumprimento das tolerâncias dimensionais e geométricas.

A empresa forneceu onze relatórios referentes a onze exemplares da peça em estudo. Estes relatórios são obtidos através de uma CMM, e os resultados são gerados com o auxílio de um *software* designado por CALYPSO. Os relatórios foram elaborados após concluídas as duas operações de maquinação (OP10 e OP20). No Anexo II encontra-se um dos relatórios, a título de exemplo.

O *software* de metrologia universal CALYPSO é um programa desenvolvido pela Carl Zeiss, que possibilita o controlo de uma CMM. Este *software* permite gerar automaticamente relatórios de medição com informações relativas a dimensões, tolerâncias dimensionais e geométricas e erros de forma.

Através da análise destes relatórios, verificou-se a existência de problemas nos resultados relativos às tolerâncias geométricas de paralelismo nas superfícies do fundo e do topo da espiral (na zona do topo) e no critério “Z Value Points”

4.2 Tolerâncias de paralelismo

Primeiramente analisaram-se as tolerâncias de paralelismo, identificadas no relatório de medição de tolerâncias dimensionais e geométricas como “Paralelismo Fundo” e “Paralelismo Topo”, com os número 44 e 51 (ver Anexo II).

O “Paralelismo Fundo” refere-se à tolerância de geométrica de paralelismo entre a superfície de fundo na zona do topo e a superfície de referência E. Enquanto que o “Paralelismo Topo” estabelece o paralelismo entre a superfície de topo da espiral e a superfície de referência E, como se apresenta na Figura 4.3.

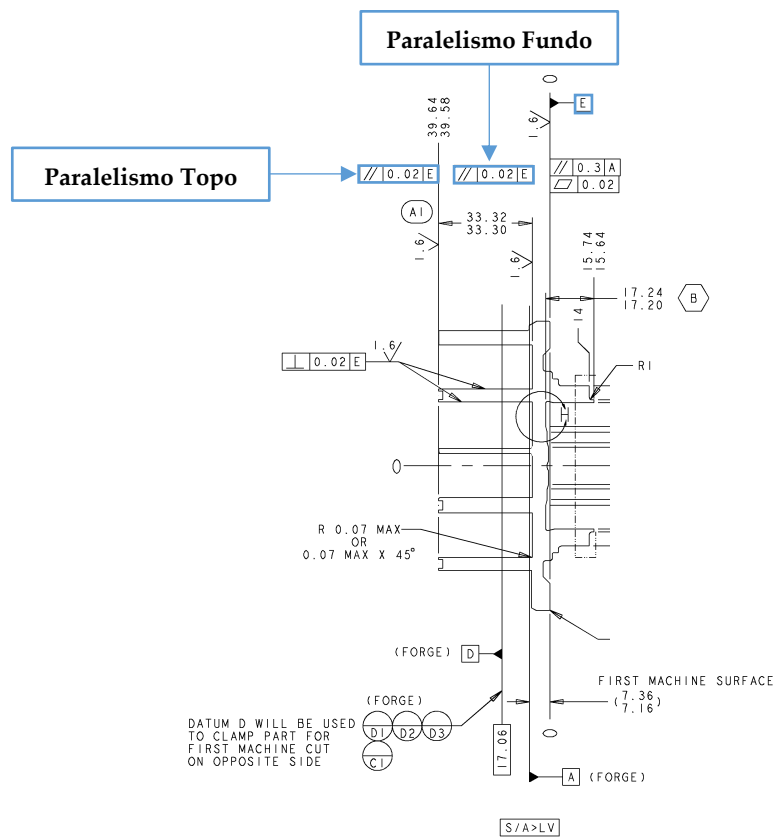


Figura 4.3 – Tolerâncias de paralelismo, referente ao Anexo I.

Ambas as tolerâncias de paralelismo têm o valor de 0,02 milímetros, com um desvio superior de 0,02 milímetros e um desvio inferior nulo, uma vez que a tolerância se encontra especificada apenas num sentido.

A verificação destas tolerâncias pela CMM inicia-se com a definição do plano de referência E (*datum* E). Este plano é obtido através da medição de vários pontos da superfície de fundo da zona da base da peça. Após a obtenção destes

pontos, o *software* CALYPSO calcula a média das alturas dos pontos medidos e gera um plano médio, que fica estabelecido como o plano de referência E. No caso da superfície de fundo da zona do topo da peça, é realizado um varrimento de pontos na superfície e é determinado um plano médio, em relação aos pontos medidos nesta superfície. O valor apresentado nos relatórios, relativo à tolerância de “Paralelismo Fundo”, é dado pela distância entre o ponto mais acima e o ponto mais abaixo do plano médio criado na superfície de fundo da zona do topo da peça. A mesma metodologia é realizada para a superfície do topo da espiral.

Em todos os relatórios analisados, observou-se que as tolerâncias de paralelismo estudadas não são respeitadas. Tendo-se verificado valores de desvio superiores à tolerância especificada de 0,02 mm. Nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2, encontram-se os valores de desvio registados nos onze componentes analisados, bem como o valor da diferença entre o desvio medido e o valor da tolerância, para as tolerância de paralelismo do fundo e do topo da zona da espiral da peça, respetivamente. As designações dadas às peças correspondem com a designação dada pela empresa nos relatórios fornecidos.

Tabela 4.1 - Valores de desvio, relativos ao paralelismo de fundo, registados nos componentes respetivos aos onze relatórios analisados

Designação da Peça	Desvio de paralelismo [mm]	Diferença entre desvio medido e a tolerância [mm]
FS 4	0,0266	+ 0,0066
FS 5	0,0260	+ 0,0060
FS 7	0,0275	+ 0,0075
MS 3	0,0305	+ 0,0105
MS 4	0,0284	+ 0,0084
MS 5	0,0277	+ 0,0077
MS 7	0,0278	+ 0,0078
MS 8	0,0299	+ 0,0099
D 9	0,0285	+ 0,0085
D 11	0,0270	+ 0,0070
D 12	0,0297	+ 0,0097
Máximo	0,0305	+ 0,0105
Mínimo	0,0260	+ 0,0060
Média	0,0280	+ 0,0080
Valor de tolerância: 0,020 mm		

Tabela 4.2 - Valores de desvio, relativos ao paralelismo da superfície do topo da espiral, registados nos componentes respetivos aos onze relatórios analisados.

Designação da Peça	Desvio de paralelismo [mm]	Diferença entre desvio medido e a tolerância [mm]
FS 4	0,0290	+ 0,0090
FS 5	0,0298	+ 0,0098
FS 7	0,0283	+ 0,0083
MS 3	0,0301	+ 0,0101
MS 4	0,0279	+ 0,0079
MS 5	0,0293	+ 0,0093
MS 7	0,0270	+ 0,0070
MS 8	0,0321	+ 0,0121
D 9	0,0284	+ 0,0084
D 11	0,0311	+ 0,0111
D 12	0,0557	+ 0,0357
Máximo	0,0557	+ 0,0357
Mínimo	0,0270	+ 0,0070
Média	0,0317	+ 0,0117
Valor de tolerância: 0,020 mm		

4.3 Parâmetro “Z Value Points”

Analisou-se, também, o parâmetro “Z Value Points”. Este parâmetro é utilizado pelo Departamento da Qualidade da empresa para verificar a distância entre a superfície de fundo na zona do topo da peça e o plano de referência E, em dez pontos diferentes (ver Anexo II). Na Figura 4.4 observa-se a localização dos dez pontos utilizados para a verificação deste parâmetro.

Como se observa na Figura 4.4, os pontos 11 a 15 (1º grupo de pontos) encontram-se localizados numa superfície diferente dos pontos 21 a 25 (2º grupo de pontos). No desenho técnico da peça não se encontra especificada a distância entre a superfície de fundo na zona do topo da peça e o plano de referência E, sendo apenas apresentado o intervalo de valores em que esta distância pode variar,

como se apresenta na Figura 4.2. Contudo a empresa utiliza para o 1º grupo de pontos a cota nominal de 6,575 mm (zona a laranja na Figura 4.4) e para o 2º grupo de pontos a cota nominal 6,300 mm (zona a amarelo na Figura 4.4), como forma de avaliar a distância entre as superfícies em cada um dos dez pontos estabelecidos (Figura 4.5). Para estas cotas referidas, a empresa estabeleceu uma tolerância dimensional de 0,02 mm bipartida.

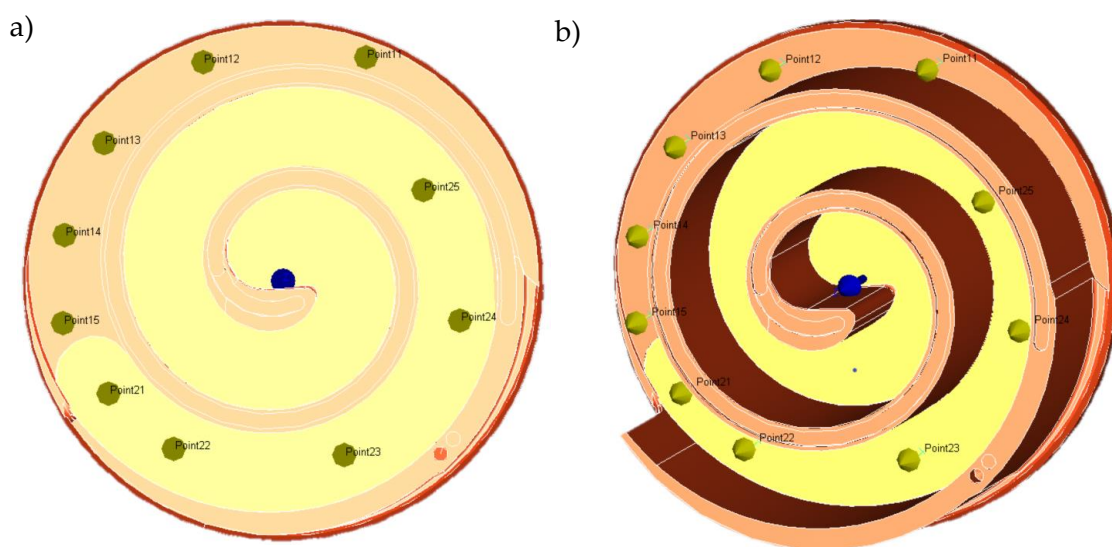


Figura 4.4 - Pontos de verificação de diferença de cotas entre fundos (legenda: a) planta; b) perspetiva)

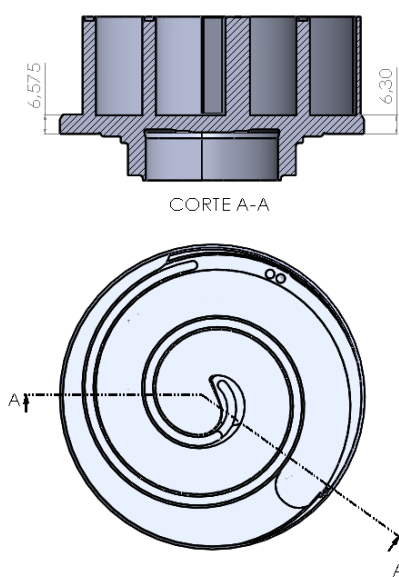


Figura 4.5 - Vista em corte do componente em estudo, com as cotas nominais avaliadas.

Depois de analisados todos os relatórios referentes a este critério, registou-se numa tabela (Tabela 4.3) a diferença entre a cota medida pela CMM e a cota nominal em cada um dos pontos de interesse, anteriormente referidos.

Tabela 4.3 - Valores relativos aos “Z Value Points” registados nos 10 pontos analisados.

Designação da Peça	Z Value Points (valores dos desvios medidos em cada um dos pontos de interesse)									
	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25
FS 4	+ 0,0071	+ 0,0170	+ 0,0206	+ 0,0142	+ 0,0109	+ 0,0082	+ 0,0036	- 0,0067	- 0,0078	+ 0,0016
FS 5	+ 0,0012	+ 0,0099	+ 0,0127	+ 0,0071	+ 0,0033	+ 0,0013	- 0,0055	- 0,0146	- 0,0164	- 0,0068
FS 7	+ 0,0070	+ 0,0186	+ 0,0182	+ 0,0114	+ 0,0067	+ 0,0038	- 0,0022	- 0,0102	- 0,0097	+ 0,0006
MS 3	+ 0,0120	+ 0,0221	+ 0,0227	+ 0,0158	+ 0,0113	+ 0,0095	+ 0,0025	- 0,0090	- 0,0083	+ 0,0035
MS 4	+ 0,0079	+ 0,0168	+ 0,0208	+ 0,0152	+ 0,0115	+ 0,0080	+ 0,0008	- 0,0077	- 0,0075	+ 0,0023
MS 5	+ 0,0122	+ 0,0228	+ 0,0227	+ 0,0155	+ 0,0121	+ 0,0094	+ 0,0041	- 0,0054	- 0,0056	+ 0,0043
MS 7	+ 0,0085	+ 0,0173	+ 0,0196	+ 0,0129	+ 0,0078	+ 0,0036	- 0,0034	- 0,0109	- 0,0091	+ 0,0018
MS 8	+ 0,0112	+ 0,0233	+ 0,0258	+ 0,0179	+ 0,0126	+ 0,0090	+ 0,0025	- 0,0070	- 0,0077	+ 0,0028
D 9	+ 0,0087	+ 0,0200	+ 0,0205	+ 0,0132	+ 0,0091	+ 0,0058	0	- 0,0087	- 0,0082	+ 0,0025
D 11	+ 0,0171	+ 0,0282	+ 0,0307	+ 0,0234	+ 0,0200	+ 0,0183	+ 0,0128	+ 0,0029	- 0,0003	+ 0,0105
D 12	+ 0,0159	+ 0,0265	+ 0,0275	+ 0,0209	+ 0,0187	+ 0,0160	+ 0,0093	- 0,0034	- 0,0044	+ 0,0067
Valor de desvio: $\pm 0,010$ mm										

4.4 Algumas conclusões

Pela análise dos dados referentes às tolerâncias geométricas de paralelismo, verificou-se que as tolerâncias específicas no desenho técnico da peça não são cumpridas em nenhuma das peças analisadas. Através dos dados relativos aos “Z Value Points”, verificou-se que existe uma zona com deformações mais acentuadas compreendida entre os pontos 11 e 14 (inclusive), sendo que o ponto 13 é onde se regista, na maioria das peças analisadas, o desvio com maior magnitude. Nesta zona, na maior parte dos componentes, a tolerância dimensional bipartida de 0,02 mm não é respeitada. Por oposição, na zona compreendida entre os pontos 21 e 25 (inclusive) observam-se menores deslocamentos, sendo que, na maioria dos casos, são cumpridas as tolerâncias especificadas.

Geralmente, em casos com vários pontos de aperto, pode ocorrer que seja exercida uma força com maior intensidade numa das zonas de aperto, provocando um desequilíbrio no sistema de forças. Contudo, tal não é suficientemente para causar os desvios apresentados nos relatórios de medição analisados. Como tal, torna-se relevante verificar se o incumprimento das tolerâncias de paralelismo está relacionado com o sistema de aperto utilizado na primeira operação de maquinação (OP10). Para tal, é importante determinar a força de indentação exercida por cada um dos três grampos de aperto, no sentido de estimar a deformação que está a ser causada por esta força, através da realização de uma simulação por elementos finitos. Dada a robustez do sistema de aperto utilizado na OP20 e as informações transmitidas pela empresa, admitiu-se que este sistema de aperto não provoca deformação significativa na peça, durante o processo de maquinação.

Quanto à força de corte, face ao apresentado na revisão bibliográfica, admitiu-se que a sua influência não é significativa, dado que esta dissertação foi realizada no seguimento de outro trabalho (Albuquerque, 2018), que concluiu que a força de aperto tem uma influência predominante na deformação final da peça, face às forças de corte exercidas, visto que, de acordo com a empresa, as operações de corte envolvidas na maquinação deste componente apresentam baixas taxas de remoção de material, o que está associado a baixas forças de corte.

5 Estudo do Sistema de Aperto da OP10

5.1 Introdução

No âmbito desta dissertação estudou-se o sistema de aperto utilizado na OP10, relacionado com a maquinação da superfície de fundo da base da peça. Uma vez que se pretende averiguar se o incumprimento das tolerâncias de paralelismo, referido no capítulo 4, está relacionado com o sistema de aperto utilizado na primeira operação de maquinação. Este sistema de aperto utilizado na operação OP10 é composto por três grampos de aperto para indentação (ver Figura 3.8). Como tal, torna-se relevante determinar uma aproximação da força de indentação aplicada por cada um dos grampos na peça.

Na determinação da força de indentação, partiu-se do conceito de dureza de indentação, que determina a resistência do material à penetração de um indentador. Este conceito está, também, correlacionado com a profundidade de indentação com que o indentador penetra no material e com a área projetada do indentador, dependendo este parâmetro da geometria do indentador, que realiza a indentação (Cheng & Cheng, 2000).

A determinação da dureza pode ser feita segundo vários métodos, dos quais se destacam os testes de Brinell, Vickers e Rockwell, no que concerne aos casos de macro-indentação. Existem normas internacionais para os vários métodos, com o objetivo de poderem ser comparados valores de dureza entre métodos (Broitman, 2017). Nesta dissertação recorreu-se a duas normas da *International Organization for Standardization* (ISO), a norma ISO 18265:2013(E), que estabelece a

conversão dos valores de dureza para várias classes de matérias metálicos, e a norma ISO 6506-1, que especifica a metodologia para a realização do teste de Brinell em materiais metálicos. Este teste tem como principal propósito determinar a dureza de indentação do material e a resistência do material à penetração de um indentador com forma esférica, como se observa na Figura 5.1 (ISO, 2014).

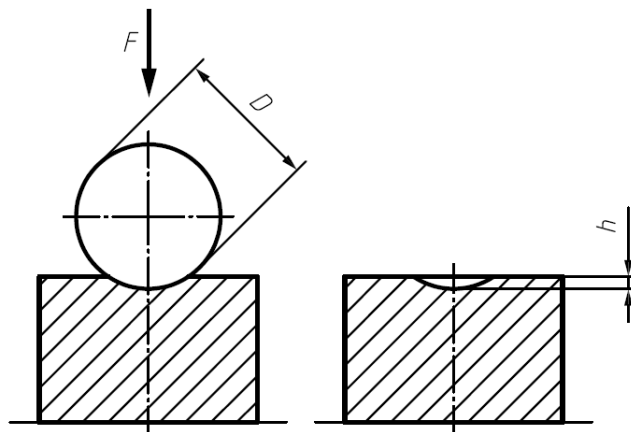


Figura 5.1 - Teste de Brinell (ISO, 2014).

5.2 Metodologia Aplicada

Primeiramente, determinou-se a área projetada pelo indentador e recorreu-se às normas ISO 18265:2013(E) e ISO 6506-1:2014(E), como forma de converter a dureza Rockwell de classe B em dureza Brinell e através desta obter a força de indentação, tendo em consideração a área projetada de indentação.

Efetuuou-se, também, a simulação por elementos finitos da configuração do sistema de aperto recorrendo à ferramenta *SolidWorks Simulation*, um módulo de simulação pertencente ao *software* de desenho assistido por computador *SolidWorks* 2018.

Por fim, efetuou-se a comparação dos resultados obtidos na simulação com os resultados presentes nos relatórios fornecidos pela empresa e procurou-se alterar a configuração de aperto inicial, com o objetivo de encontrar uma solução que permita reduzir as deformações e, consequentemente, os desvios verificados.

5.3 Determinação da Força de Indentação aplicada

Com o objetivo de estimar a força de indentação aplicada pelos grampos de aperto sobre a superfície da espiral da peça em estudo, recorreu-se ao conceito de dureza de indentação.

Neste estudo, a força de indentação foi determinada através do método proposto por Oliver & Pharr (1992), que define a dureza como a pressão média que o material tem capacidade para suportar sob um determinado valor de carga. Assim, o autor concluiu que a dureza pode ser calculada a partir da seguinte expressão (equação 1):

$$H_I = \frac{F_I}{A_c} \quad (1)$$

Onde H_I representa a dureza de indentação (pois na língua inglesa a palavra dureza é “*Hardness*”), que é dada pelo rácio entre a força de indentação máxima (F_I), em N, e a área projetada pelo indentador (A_c), em mm².

Neste estudo, assume-se que a área de contacto é a área definida pela aplicação da força, enquanto que a área projetada é área que fica marcada na peça após a aplicação da força, na indentação.

Primeiramente procurou-se determinar a área projetada, em consequência do contacto entre o indentador e o material indentado, neste caso, a superfície da espiral do componente em estudo. Tendo o indentador geometria cónica e ponta esférica, a área projetada é circular, e assim dada pela expressão referente à área de um círculo ($A_c = \pi r^2$). Nesta expressão, r é o raio da circunferência maior da área de contacto. Assim, para uma indentação de 1 mm corresponde um raio de 1 mm (ver Figura 3.) e uma área de contacto de aproximadamente 3 mm².

A dureza de um material, no estado sólido, pode ser definida com uma medida de resistência à alteração permanente da sua forma quando submetido a forças de compressão constantes. No caso dos metais, a dureza surge associada à deformação plástica da superfície (Broitman, 2017).

No âmbito desta dissertação pretende-se analisar a deformação produzida pelo processo de indentação, para tal procedeu-se à conversão da dureza do material em dureza de indentação.

A peça em estudo é produzida numa liga de alumínio para forjamento que apresenta uma dureza de 70 HRB (ver Tabela 3.2). Esta medida de dureza corresponde à escala B do método de medição de dureza Rockwell.

O método de Rockwell permite determinar a dureza de um material através da medição da profundidade de penetração de um indentador sob uma elevada carga em comparação com a profundidade de penetração de uma pré-carga de intensidade mais baixa. No caso da escala B do método de Rockwell, esta medição é efetuada com uma esfera de aço com 1.588 milímetros de diâmetro (Broitman, 2017), como apresentado na Figura 5.2.

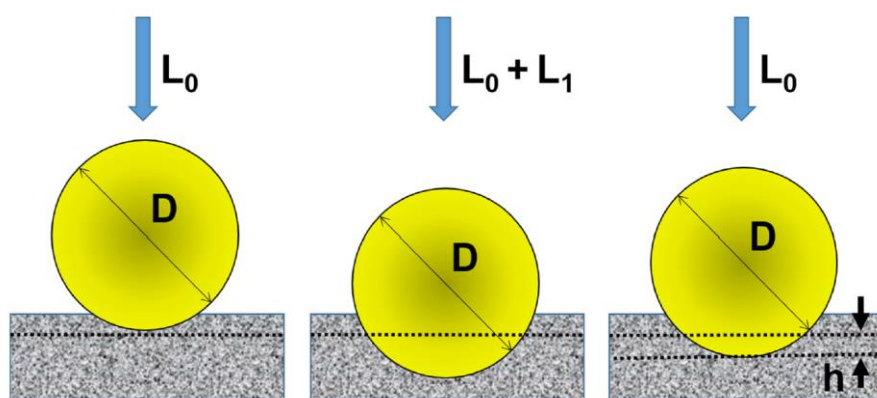


Figura 5.2 - Princípio do método de Rockwell com uma esfera de aço (Broitman, 2017).

Primeiramente optou-se por converter a dureza Rockwell de escala B (HRB) em dureza Brinell (HBW), para tal recorreu-se à norma ISO 18265 de 2013, que se refere à conversão de valores de dureza para materiais metálicos. Nesta norma consultou-se a Tabela F.5 (Anexo III), que apresenta a conversão de valores de dureza específicos para materiais compostos por ligas de alumínio. Na Tabela F.5, na gama de valores de dureza apresentados na coluna com valores em HRB, não consta o valor de 70. Contudo, através de uma operação de interpolação linear resultou um valor de dureza equivalente de 121 HBW.

Por fim, com o objetivo de estimar o valor da força de indentação aplicada, tendo em conta a dureza da liga de alumínio do componente em estudo, consultou-se a norma ISO 6506-1:2014. Esta norma tem como objetivo explicitar a metodologia do teste de dureza Brinell, no que concerne a materiais metálicos. No Anexo IV encontra-se um excerto da norma ISO 6506-1:2014, donde se obteve a equação utilizada no cálculo da força de indentação.

A norma apresenta uma fórmula de cálculo da dureza Brinell (equação 2), tendo como variáveis a força de teste (F_I) e a área projetada de indentação (A_c)

$$HBW = c \times \frac{F_I}{A_c}, \quad c = 0,102 \quad (2)$$

A constante expressa por c , representa o fator de conversão de quilograma-força (kgf) para newton (N). Assim, com os valores de dureza Brinell e da área projetada de indentação calculados, obteve-se o valor de 3727 N para a força de indentação (equação 3).

$$F_I = \frac{HBW \times A_c}{0,102} = \frac{121 \times 3}{0,102} \cong 3727 \text{ N} \quad (3)$$

O valor da força de indentação determinado, que representa a carga efetivamente aplicada por cada um dos três grampos, que fazem parte do sistema de aperto da peça utilizado na empresa, foi o valor considerado na realização da simulação da condição de aperto da peça.

5.4 Simulação da condição de Aperto

5.4.1 Metodologia e a Importância da Simulação

A simulação da condição de aperto foi realizada através do *software SolidWorks Simulation*, que permite a resolução de problemas relacionados com o projeto mecânico através do MEF. O MEF é um método numérico que permite realizar a simulação do comportamento de um sistema físico e a resolução de problemas envolvendo geometrias, comportamentos físicos e/ou condições de fronteira complexas. Um problema resolvido pelo MEF envolve três etapas, a primeira designa-se por pré-processamento, que é a fase onde se realiza a discretização do problema através da sua definição e da aplicação das condições de fronteira, das características geométricas e das propriedades do material. Nesta etapa é realizada, ainda, a construção de uma malha de elementos finitos, com base na

caraterização realizada. A segunda fase é a solução, permitindo obter a solução da assemblagem das equações dos elementos definidos no pré-processamento.

Por fim, no pós-processamento processa-se os resultados em pontos de interesse para o âmbito do estudo. Permitindo o cálculo de deslocamentos, reações nos apoios, tensões ou esforços internos que podem ser apresentadas sob a forma numérica ou gráfica. Nesta etapa é possível realizar uma interpretação e discussão dos resultados do problema, permitindo interceder quanto à veracidade física dos resultados obtidos (Coelho, 2017). Esta abordagem permite reduzir o tempo de desenvolvimento de um produto, bem como, os recursos utilizados, visto que fornece uma previsão bastante aproximada do comportamento real de uma peça quando submetida a cargas externas.

No âmbito da engenharia simultânea, o desenvolvimento de sistemas de Projeto Assistido por Computador (CAD) em conjunto com sistemas computorizados de comunicação e armazenamento de informação permite que o desenvolvimento de um produto seja realizado, em paralelo, por várias equipas de trabalho, de diferentes departamentos. Desta forma, é promovido o desenvolvimento de equipas de trabalho multifuncionais, com conhecimento mútuo das capacidades dos vários departamentos intervenientes, permitindo melhorar a funcionalidade, o desempenho e a qualidade do produto final (A. J. F. Mourão, 1999).

Na simulação realizada no *software SolidWorks Simulation*, recorreu-se ao modelo da peça em estudo fornecido pela empresa, tendo-se optado por utilizar o modelo da peça não maquinado, pois neste estudo pretende-se analisar o efeito da indentação da primeira operação realizada (OP10), com a peça em bruto, proveniente do processo de forjamento.

5.4.2 Pré-Processamento

O objetivo da simulação desenvolvida, neste estudo, através do MEF é reproduzir, da forma mais realista possível, a condição de aperto do componente em estudo. Começou-se por estabelecer as condições de fronteira a que a peça está sujeita. O *software SolidWorks Simulation* permite estabelecer o tipo de fixação a que a peça está submetida. Para este caso, definiu-se, no modelo computacional

da peça, uma fixação equivalente a um apoio fixo, tendo-se fixado uma superfície exterior da zona da base da peça. A fixação colocada tem como objetivo analisar o comportamento das duas superfícies de fundo, da base e do topo face à condição de aperto. Assim, optou-se por fixar uma superfície exterior da base, apresentada na Figura 5.3 a cor-de-laranja, de forma a não influenciar a deformação da peça. As setas a verde representam o tipo de restrição descrito.

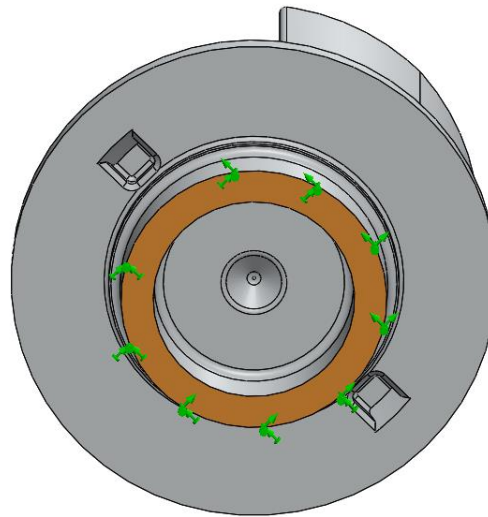


Figura 5.3 - Condição de fronteira de fixação da peça para simulação de condição de aperto.

Relativamente às cargas aplicadas na peça, criou-se três áreas circulares espaçadas de 120° entre si, com um diâmetro de 2 milímetros e distanciadas de 3 milímetros da superfície de fundo da zona do topo da peça (Figura 5.4). Este dimensionamento é equivalente à área projetada de indentação calculada e traduz o contacto entre os grampos de indentação e as zonas de aperto. Nestas áreas é aplicada a força de indentação com intensidade igual a 3727 N, determinada na secção 5.3.

Nesta fase procedeu-se, ainda, à definição da malha de elementos finitos. No MEF, o domínio de um problema é subdividido num conjunto de elementos, designados por elementos finitos. Um conjunto de elementos finitos num domínio é designado por malha de elementos finitos (Cardoso, 2018).

Nesta análise, na geração da malha utilizou-se elementos com geometria triangular. O elemento triangular utiliza funções de forma lineares, com derivada constante dentro de cada elemento, conduzindo a uma aproximação grosseira do campo de tensões (Cardoso, 2018). No entanto, tendo em conta a geometria da

peça e a precisão desejada para a solução do problema, considerou-se que este tipo de elemento permite obter resultados próximos da realidade, para o problema em estudo.

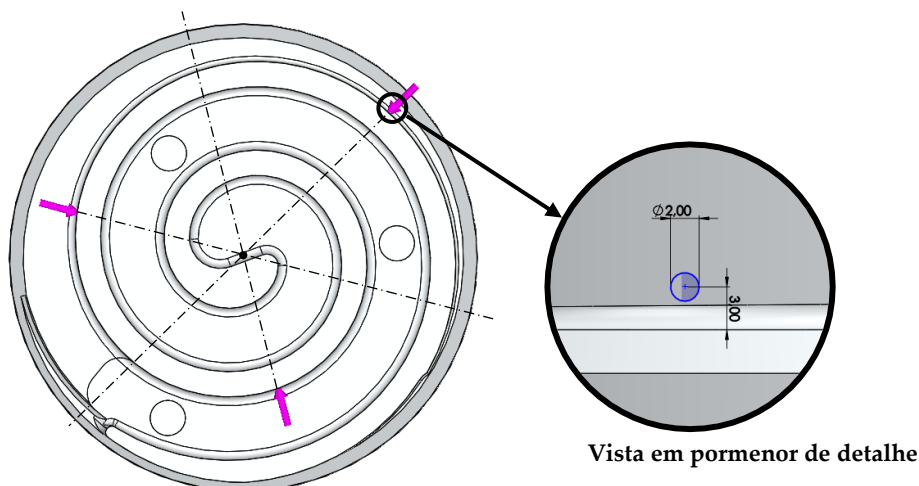


Figura 5.4 - Localização e geometria das zonas de indentação.

Os números de nós e de elementos definido num problema, aquando da divisão do domínio total, depende principalmente da geometria e da precisão desejadas para a solução do problema. Assim, realizou-se uma análise de convergência da malha de elementos finitos, com o objetivo de encontrar o grau de precisão necessário para o problema em causa neste estudo. Esta análise compreendeu a realização de várias simulações, em que se foi refinando a malha gradualmente, através do aumento do número de elementos. O método descrito é designado por *h-method*, em que a variável h se refere à dimensão linear que caracteriza o elemento (Coelho, 2017). Na Tabela 5.1 apresenta-se os dados relativos à análise de convergência realizada neste estudo, em que se refere os números de elementos e de nós para cada simulação, a dimensão linear que caracteriza o elemento triangular (h), a percentagem de elementos distorcidos e o deslocamento medido no ponto assinalado na Figura 5.5.

Com a realização da análise de convergência, concluiu-se que o número mínimo de nós e de elementos, a partir do qual é garantida a convergência dos valores relativos ao deslocamento medido, é de 40289 e de 25000, respetivamente. Ou seja, verifica-se convergência nos valores de deslocamento das simulações 4, 5 e 6. Como tal, assumiu-se os valores relativos ao número de nós e de elementos referentes à simulação 4. Na Figura 5.6 apresenta-se a malha de elementos finitos

utilizada para a realização da simulação da condição de aperto referente ao componente em estudo, com 40289 nós e 25000 elementos.

Tabela 5.1 - Análise de convergência da malha de elementos finitos.

Nº Simulação	Nº de Nós	Nº de Elementos	h [mm]	Elementos distorcidos [%]	Deslocamento [μ m]
1	7633	4281	11,2	0	9
2	10603	6014	8,7	0	10
3	19338	11439	6,0	0	10
4	40289	25000	4,3	0	11
5	61826	38927	3,5	0	11
6	100505	64489	2,8	0	11

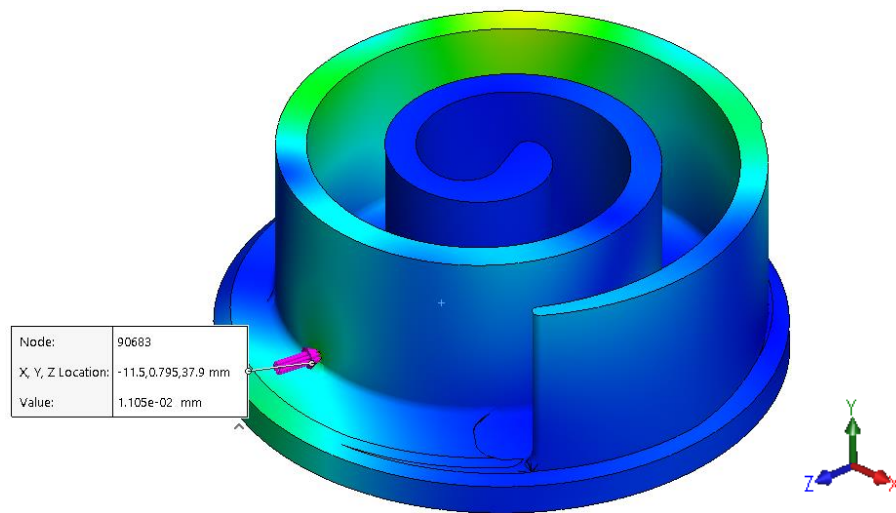


Figura 5.5 – Ponto de medição do deslocamento para a análise de convergência.

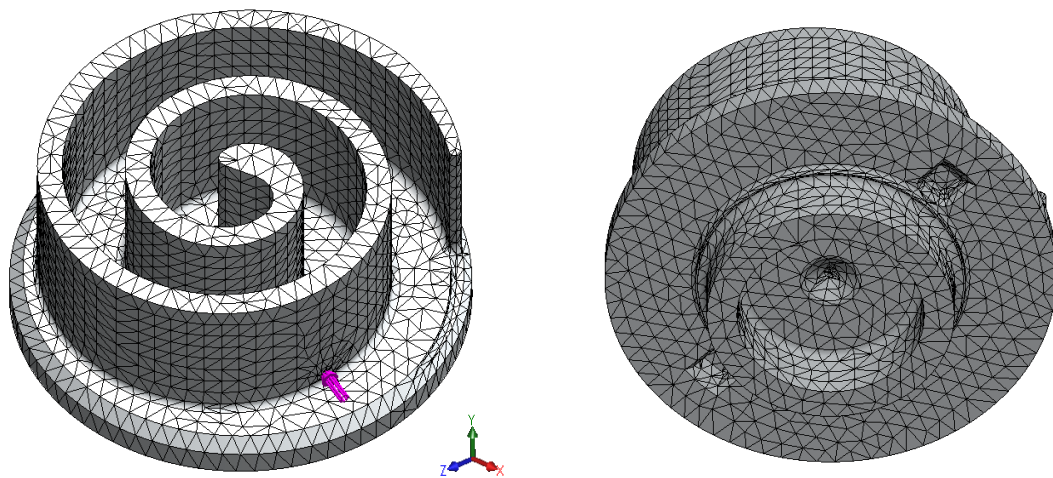



Figura 5.6 - Malha de elementos finitos utilizada na simulação da condição de aperto.

O *software*, sempre que realiza uma nova simulação, gera uma nova malha de elementos finitos. Portanto, entre simulações existem pequenas diferenças na malha gerada. Contudo, verificou-se, após a análise de cinco simulações diferentes, que o resultado relativo ao deslocamento, num mesmo ponto, não sofre alterações significativas (Tabela 5.2). Assim, é assegurada a independência da malha de elementos finitos utilizada na simulação em estudo nesta dissertação.

Tabela 5.2 - Análise da variação aquando da geração da malha de elementos finitos no nó número 22244.

Nº Simulação	Nº de Nós	Nº de Elementos	 [mm]	Deslocamento [μm]
1	40289	25000	4,3	11
2				11
3				11
4				11
5				11

5.4.3 Solução e Pós-Processamento

Neste estudo pretende-se determinar o deslocamento em pontos de interesse na superfície de fundo da zona do topo da peça. Na fase de pós-processamento procede-se à determinação numérica e gráfica das variáveis pretendidas, nos pontos de interesse. O *software*, após executar a solução da simulação, gera resultados em cada nó relativos ao deslocamento e à tensão. Estes resultados são ilustrados de forma gráfica, permitindo, através de uma legenda com a variação dos valores da grandeza apresentada por uma gradação de cores, obter uma ideia global do comportamento da peça. Os resultados são apresentados, também, de forma numérica.

Primeiramente procurou-se averiguar se a peça sofre deformação plástica. Para tal analisou-se os resultados gráficos, no que se refere aos valores da tensão de Von Mises, verificados ao longo da peça (Figura 5.7). O critério de Von Mises afirma que: “Existe deformação plástica quando a energia de distorção por unidade de volume atinge o valor da energia de distorção por unidade de volume necessária para causar a cedência do provete no ensaio de tração” (Cardoso,

2016), expresso pela equação 4, em que σ_I , σ_{II} e σ_{III} se referem às tensões segundo as direções x, y e z do elemento, e σ_c se refere à tensão de cedência.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq \sigma_c \quad (4)$$

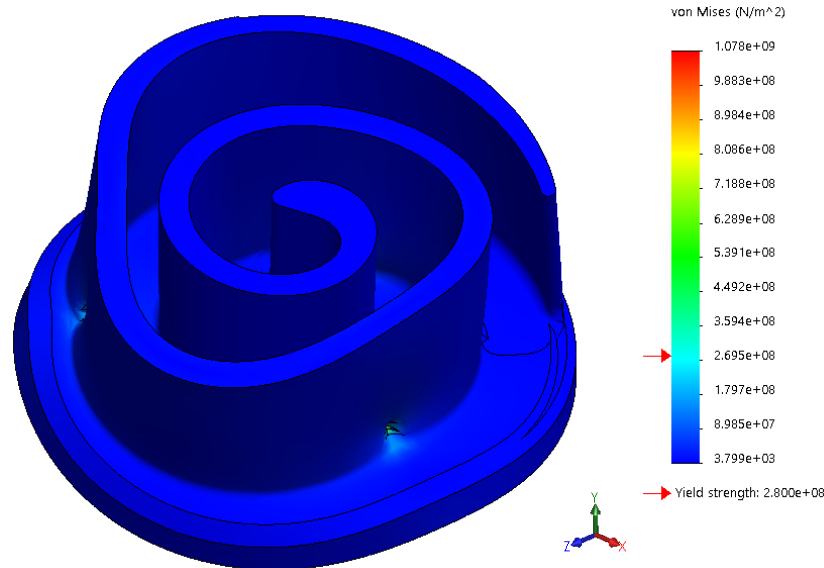


Figura 5.7 - Representação dos resultados gráficos relativos à tensão de Von Mises.

Contudo, verifica-se através da análise da Figura 5.7, que não ocorre deformação plástica da superfície da peça, com exceção, apenas, nas zonas de indentação, pois os valores de tensão não ultrapassam a tensão de cedência do material de 280 MPa. A deformação plástica que ocorre nas zonas de indentação da peça, resulta do próprio processo de aperto, que envolve a penetração do indentador na superfície da espiral.

Analizou-se, ainda, as deformações provocadas pela operação de aperto com indentação do material. Para tal, é de enorme relevância a análise dos resultados numéricos do deslocamento em cada nó, assumindo que traduz a deformação existente na peça durante esta operação.

Verifica-se na Figura 5.8, que as zonas onde as deformações são maiores (áreas em tons de verde), são as áreas em redor das zonas de aperto, onde ocorre deformação da parede da espiral por indentação do material, sendo neste caso avaliada os deslocamentos resultantes na peça.

Na superfície de fundo da zona do topo da peça, o deslocamento máximo é de $20,4 \mu\text{m}$, que ocorre na zona em redor da área de indentação do ponto de aperto mais afastado do centro da peça, como ilustrado na Figura 5.9.

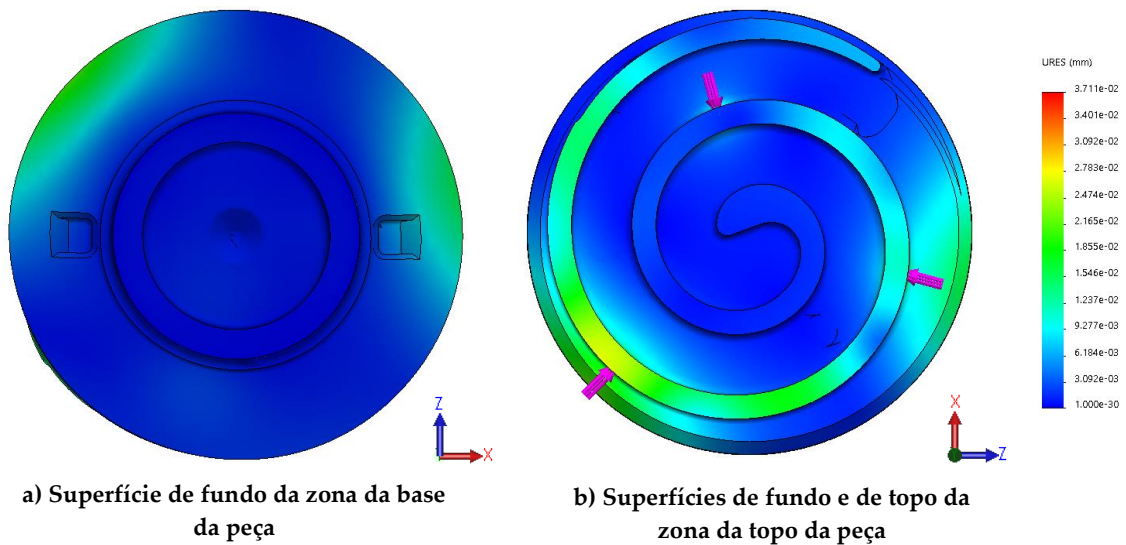


Figura 5.8 - Representação gráfica dos deslocamentos ao longo da superfície da peça.

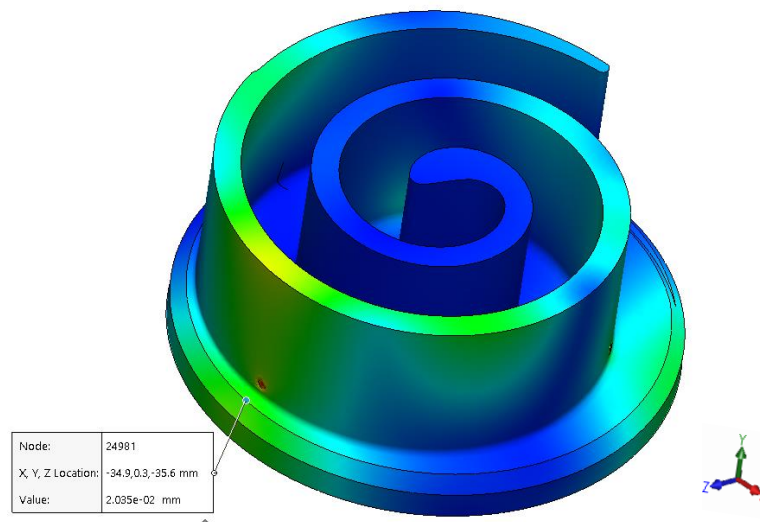


Figura 5.9 - Ponto de deslocamento máximo, relativo aos deslocamentos resultantes.

Neste estudo, com o objetivo de realizar a comparação entre os resultados obtidos na simulação e os resultados dos relatórios analisados no Capítulo 4, observou-se a deformação na peça segundo o eixo vertical (Y), como ilustrado na Figura 5.10.

Admitiu-se como pontos de interesse para a medição dos deslocamentos, os pontos identificados na Figura 5.10. A escolha dos pontos, bem como a sua designação, foi feita de forma a facilitar a comparação destes resultados com os dados, presentes nos relatórios fornecidos pela empresa, referentes aos “*Z Value Points*” (ver Figura 4.4). Ressalva-se que os desvios obtidos na simulações e nas medições ocorrem em locais diferentes, dado que a peça é maquinada com deformação, recuperando a sua forma após o processo de maquinação ter finalizado, quando o sistema de aperto é desativado. Observando-se uma deformação com orientação contrária à exibida na simulação.

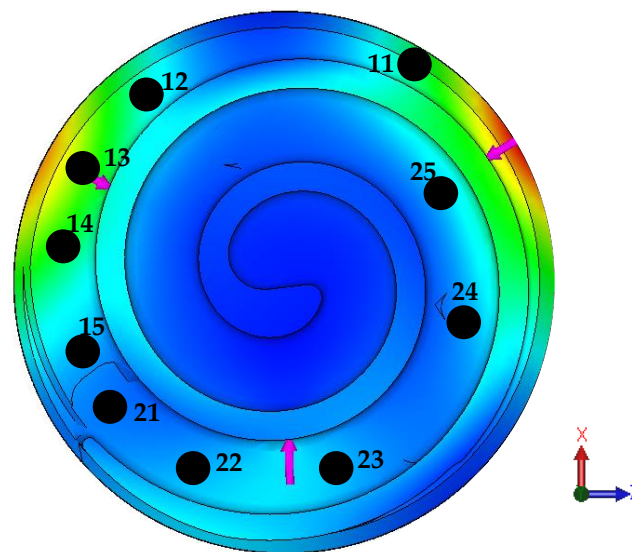


Figura 5.10 - Pontos de interesse para medição do deslocamento (plano xz).

Através da análise dos resultados numéricos nos pontos de interesse, utilizando a ferramenta *Probe* do *SolidWorks Simulation*, obteve-se os valores absolutos de deslocamento nos dez pontos de interesse, como se apresenta na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Deslocamento medido na simulação nos pontos de interesse segundo a direção de y.

Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25
Deslocamento [μm]	11	13	16	14	5	3	3	5	5	3

Com os resultados, gráficos e numéricos, pode-se concluir que os valores de deslocamento, obtidos na zona que abrange os pontos 11, 12, 13 e 14, ultrapassam o limite definido pela tolerância dimensional bipartida, com desvio superior e inferior igual a $10\text{ }\mu\text{m}$, tal como foi verificado no capítulo 4 (Tabela 4.3) e na análise efetuada na secção 5.4.4. Verifica-se, também, que a peça está sujeita a uma deformação triangular (Figura 5.11), visto que as maiores deformações ocorrem nas três zonas da peça onde é realizado o aperto com indentação, resultante do contato entre os grampos e a superfície da peça.

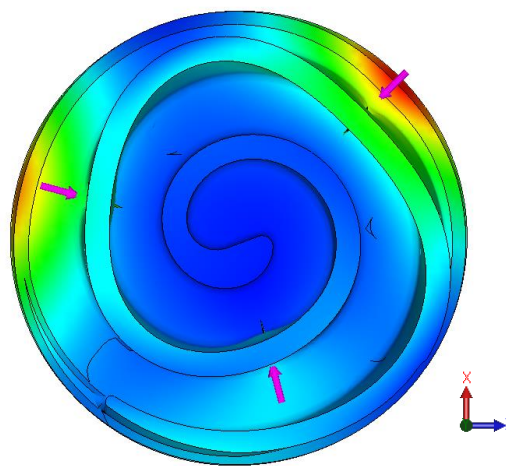


Figura 5.11 - Deformação triangular da peça em estudo, segundo a direção do eixo vertical (plano xz).

Relativamente à superfície de fundo da zona do topo da peça, o maior deslocamento, segundo a dire o de Y,   de cerca de $18\text{ }\mu\text{m}$ e ocorre junto ao ponto de aperto mais afastado do centro da peça (Figura 5.12).

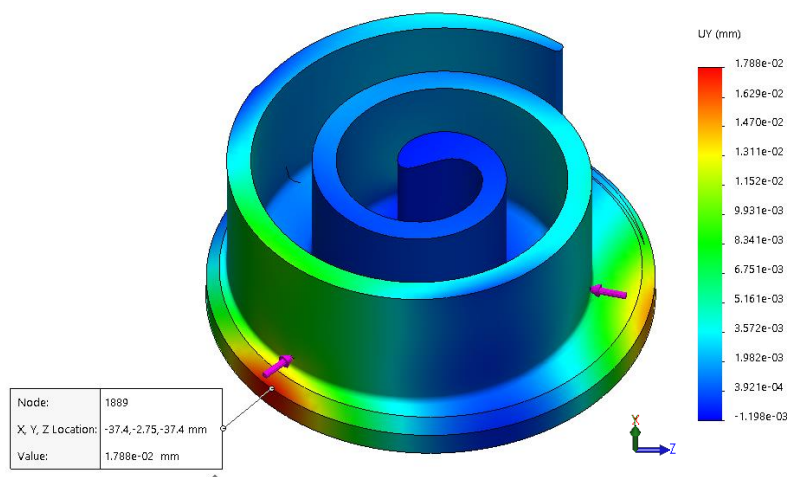


Figura 5.12 - Deslocamento máximo imposto na peça segundo a dire o do eixo Y.

5.4.4 Comparação com dados facultados nos relatórios

A simulação da condição de aperto recorrendo ao *software SolidWorks Simulation*, teve como um dos principais objetivos realizar a comparação entre os resultados obtidos através da simulação e os resultados facultados pelo Departamento da Qualidade da empresa, através de uma CMM.

A comparação foi feita analisando os deslocamentos nas superfícies de fundo das zonas do topo e da base da peça. Esta medição dos deslocamentos nos pontos de interesse, foi realizada recorrendo à ferramenta *Probe*, do *software SolidWorks Simulation*.

As informações, apresentadas nos relatórios fornecidos pela empresa, apresentam as posições dos pontos na peça após as duas operações de maquinação (OP10 e OP20), enquanto que na simulação se avaliou apenas as deformações decorrentes do aperto com indentação realizado antes da primeira operação de maquinação (OP10). Assim, a comparação está a ser realizada entre duas etapas diferentes do processo de maquinação do componente em estudo, o que tem como consequência que os desvios apresentados na simulação ocorram em locais diferentes, dado que a peça recupera a sua forma devido ao fenómeno de recuperação elástica, após a remoção dos grampos de aperto, o que resulta numa deformação da peça contrária à deformação existente no momento do aperto. Assim, aquando da obtenção dos resultados da simulação, não se considerou a orientação das deformações, mas sim a sua magnitude.

Visto que este aspeto não foi considerado no modelo utilizado para realizar a simulação, através do *software SolidWorks Simulation*, não se considerou a orientação das deformações na comparação entre resultados. Contudo, os resultados podem ser considerados válidos, uma vez que as deformações ocorridas na peça, após esta ser retirada da bucha de aperto, são opostas às observadas na simulação em consequência do fenómeno de recuperação elástica que a peça sofre. Assim, pretende-se, apenas, averiguar o impacto da magnitude da força de aperto na deformação da peça, independentemente da sua orientação, dado que na simulação se observa a orientação das deformações no momento de aperto e que nas medições estas deformações vão possuir orientação contrária.

Começou-se por comparar os resultados obtidos na simulação nos dez pontos de interesse selecionados (*Z Value Points*) e os resultados dos relatórios da CMM, para os mesmos pontos (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Comparação dos deslocamentos (valores em módulo) entre simulação e dados fornecidos nos relatórios.

Deslocamentos [μm]		Pontos de Interesse (diferença para cota nominal)									
		11	12	13	14	15	21	22	23	24	25
Designação da Peça	FS 4	7	17	20,6	14,2	10,9	8,2	3,6	6,7	7,8	1,6
	FS 5	1,2	9,9	12,7	7,1	3,3	1,3	5,5	14,6	16,4	6,8
	FS 7	7	18,6	18,2	11,4	6,7	3,8	2,2	10,2	9,7	0,6
	MS 3	1,2	22,1	22,7	15,8	11,3	9,5	2,5	9	8,3	3,5
	MS 4	7,9	16,8	20,8	15,2	11,5	8	8	7,7	7,5	2,3
	MS 5	12,2	22,8	22,7	15,5	12,1	9,4	4,1	5,4	5,6	4,3
	MS 7	8,5	17,3	19,6	12,9	7,8	3,6	3,4	10,9	9,1	1,8
	MS 8	11,2	23,3	25,8	17,9	12,6	9	2,5	7	7,7	2,8
	D 9	8,7	20	20,5	13,2	9,1	5,8	0	8,7	8,2	2,5
	D 11	17,1	28,2	30,7	23,4	20	18,3	12,8	2,9	0,3	10,5
	D 12	15,9	26,5	27,5	20,9	18,7	16	9,3	3,4	4,4	6,7
	Simulação	11	13	16	14	5	3	3	5	5	3
Tolerância: 0,02 mm											

Os mesmos resultados são apresentados de forma gráfica (Figura 5.13) para que seja possível comparar, com maior facilidade, os resultados fornecidos nos relatórios e os resultados obtidos na simulação. Verifica-se que os dados obtidos na simulação (identificado pela linha laranja), relativamente aos deslocamentos nos pontos de interesse, se enquadram na gama de valores em que variam os deslocamentos (identificado pelos círculos referentes às 11 peças analisadas), em cada ponto de interesse. Quando se compara os resultados, observa-se, também, que os pontos de interesse 11, 12, 13 e 14 são os mais críticos, relativamente ao limite superior da tolerância especificada (ilustrado pela linha de traço ponto vermelha), tal como foi verificado no Capítulo 4. Verifica-se, também, concordância entre os resultados da simulação e os resultados obtidos pela CMM, relativamente à zona compreendida entre os pontos 21 e 25 ser uma zona com menores

deformações, sendo que nesta zona é cumprida a tolerância dimensional bipartida de 0,02 mm, quer na simulação, quer na maioria dos resultados obtidos pela CMM nestes pontos de interesse.

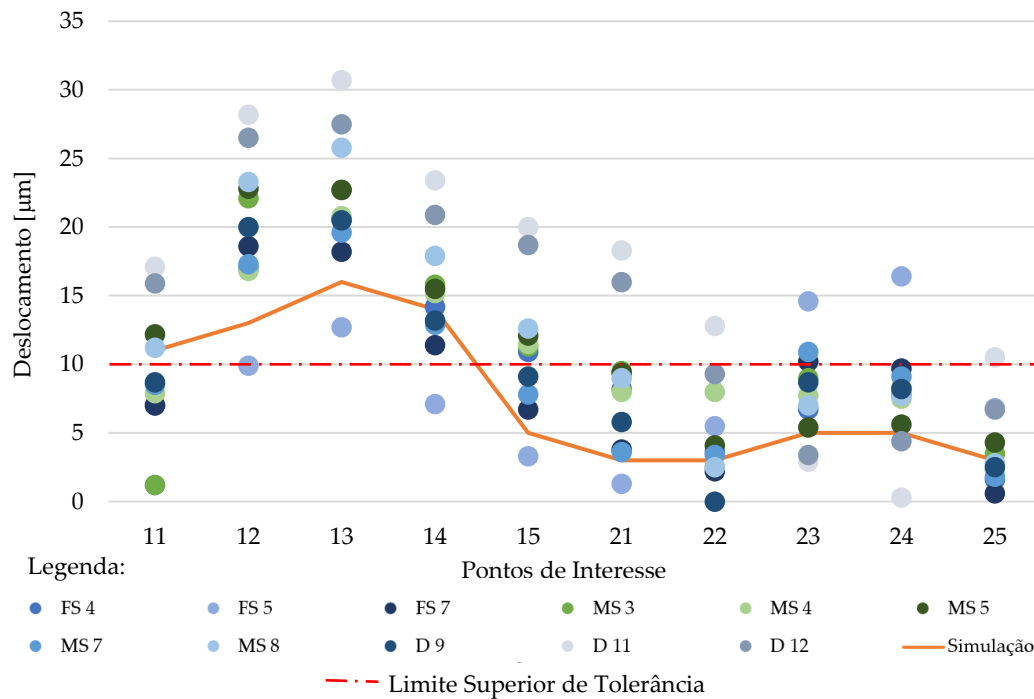


Figura 5.13 - Comparação gráfica de resultados obtidos pela CMM e através da simulação.

Assim, conclui-se que existe semelhança na comparação entre resultados, no que concerne às zonas onde existem deformações de maior amplitude das mesmas, pelo que se pode associar a magnitude da força de indentação às deformações verificadas na superfície de fundo da zona do topo da peça. Pelo que se pode afirmar que a simulação computacional realizada, recorrendo ao *software SolidWorks Simulation*, permite prever, com alguma precisão, as deformações a que a peça está sujeita. Estes resultados permitem, também, validar a abordagem tomada para a estimativa da força de indentação exercida por cada grampo.

Quanto às deformações na superfície de fundo da base da peça, seria de esperar que tivessem magnitude semelhante à verificada na superfície de fundo da zona do topo da peça, para os mesmos pontos (Figura 5.14). No entanto, optou-se por efetuar a medição do deslocamento no modelo computacional, referentes aos pontos de interesse como se apresenta na Tabela 5.5.

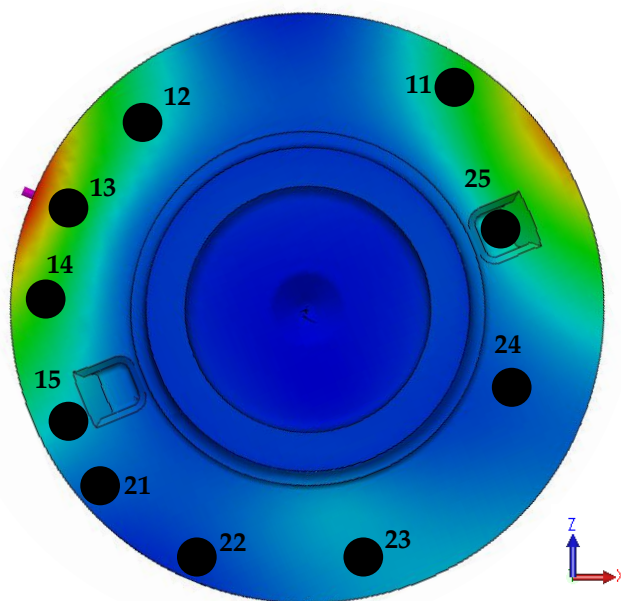


Figura 5.14 - Pontos de interesse para medição do deslocamento na base, na direção de y.

Tabela 5.5 - Deslocamentos medidos no modelo computacional na superfície de fundo da base.

Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25
Deslocamento na base da espiral [μm]	11	12	15	13	6	2	3	5	5	4
Deslocamento no topo da espiral [μm]	11	13	16	14	5	3	3	5	5	3

Como esperado, os valores de deformação verificados em ambas as superfícies são semelhantes, pelo que se pode admitir que a magnitude da força de indentação pode estar associada à deformação exibida. Esta conclusão é sustentada pela simulação realizada e pelos resultados dos relatórios obtidos pela medição de várias peças.

A superfície de fundo da zona da base da peça é determinada, no desenho técnico da peça (Anexo I), como a superfície de referência para a medição das tolerâncias de paralelismo referentes às superfícies da base e do topo da espiral, como ilustrado na Figura 5.15.

Assim, a deformação da superfície de referência E (*datum* E) pode estar a influenciar as medições relativas às tolerâncias de paralelismo das zonas da base e do topo da espiral.

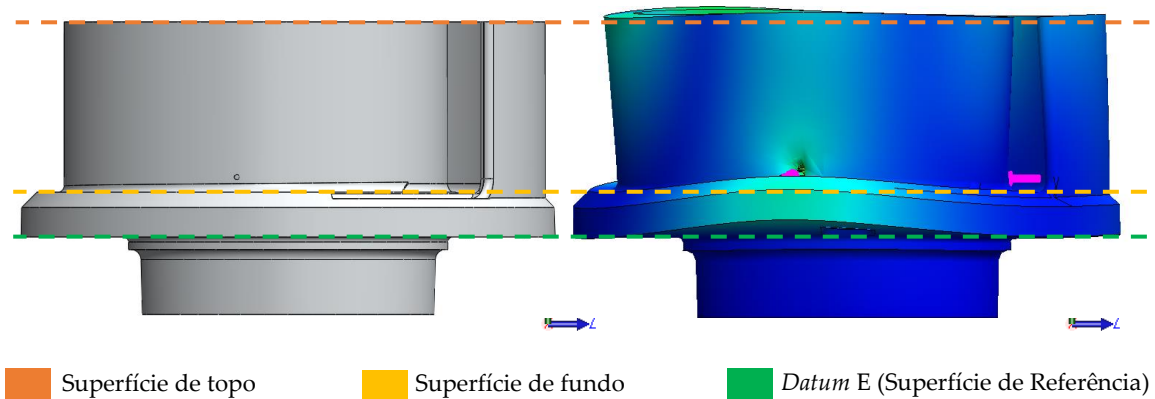


Figura 5.15 - Apresentação das superfícies de referência, de fundo e de topo na peça sem e com deformação.

Relativamente à tolerância geométrica de paralelismo referente à superfície de fundo da zona do topo da peça (Paralelismo Fundo), verificou-se que as deformações existentes nas superfícies de fundo da zonas da base e do topo são semelhantes. Como tal, visto que esta superfície tem como referência o plano de referência E (ver Figura 4.1), os desvios verificados neste parâmetro (Capítulo 4) podem estar associados à magnitude da força de indentação.

Quanto à tolerância geométrica de paralelismo da superfície de topo da espiral, verifica-se que os desvios medidos são da mesma ordem de grandeza dos desvios medidos relativamente à tolerância geométrica de paralelismo da superfície de fundo da zona do topo da peça, como se observa na Figura 5.17 e na Tabela 5.6, em que se comparam os desvios medidos para ambas as tolerâncias de paralelismo.

Na elaboração da Figura 5.16 e da Tabela 5.6 desprezaram-se as medições relativas à peça D12, pois apresentam um desvio relativo à tolerância de paralelismo do topo da espiral muito superior às restantes peças, o que pode ter sido consequência de um erro na medição ou no processo produtivo do componente em estudo.

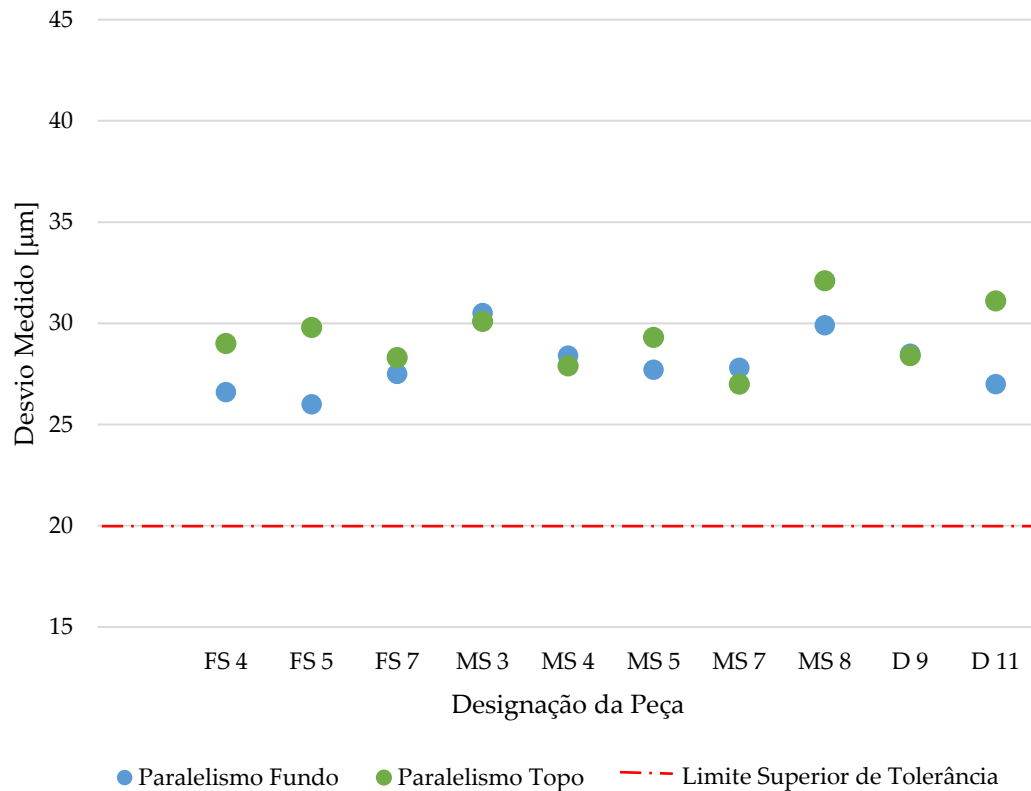


Figura 5.16 - Comparação gráfica entre critérios “Paralelismo Fundo” e “Paralelismo Topo”.

Tabela 5.6 - Comparação numérica entre critérios “Paralelismo Fundo” e “Paralelismo Topo”.

Designação da Peça	Desvio medido [μm]	
	Paralelismo fundo	Paralelismo topo
FS 4	26,6	29
FS 5	26	29,8
FS 7	27,5	28,3
MS 3	30,5	30,1
MS 4	28,4	27,9
MS 5	27,7	29,3
MS 7	27,8	27,0
MS 8	29,9	32,1
D 9	28,5	28,4
D 11	27	31,1
Máximo	30,5	32,1
Mínimo	26	27
Média	28	29

Assim, conclui-se que a magnitude da força de indentação, submetida pelo sistema de aperto, pode estar a influenciar os resultados relativos à tolerância de

paralelismo do topo da espiral, como consequência das deformações que estão a ser causadas por esta força na superfície de referência E (*datum* E). Esta influência pode estar relacionada com o fenómeno de recuperação elástica, que a peça sofre após a realização da OP10. Pois a peça está deformada elasticamente no decorrer desta operação, como tal, após a conclusão da maquinação da primeira operação de maquinação, e do processo de desaperto da mesma, a superfície de fundo da zona da base da peça apresenta uma deformação contrária à exibida nas simulações. Pelo que esta deformação na superfície de referência E pode estar associada à deformação verificada na superfície de topo da espiral, uma vez que a superfície de topo da espiral é maquinada tendo como referência o *datum* E.

Refere-se, ainda, que seria relevante incluir no relatório de medição, realizado através da CMM, a verificação da tolerância geométrica de planeza associada à superfície de referência E, uma vez que esta tolerância não está a ser verificada. A análise desta tolerância geométrica pela CMM pode contribuir para este estudo, dado que pode existir um incumprimento relativo a esta tolerância devido à deformação que a peça está a sofrer em consequência do fenómeno de recuperação elástica, referido acima, resultante da força de indentação exercida na superfície da espiral da peça. Este incumprimento da tolerância geométrica de planeza pode constituir mais uma fonte de erro que está a contribuir para os desvios verificados na peça.

6 Alteração da Condição de Aperto

6.1 Introdução

Face aos resultados obtidos na simulação de elementos finitos, torna-se relevante alterar as condições de aperto inicialmente estabelecidas, com o objetivo de encontrar novas configurações de aperto que provoquem menores deformações na peça.

Na revisão bibliográfica (Capítulo 2) referem-se vários estudos que foram efetuados sobre a temática de otimização de sistemas de aperto, observando-se nestes estudos a aplicação de diversas metodologias e diferentes abordagens a este problema.

No entanto, com base na análise efetuada optou-se por efetuar várias simulações da condição de aperto, em que se procurou alterar algumas variáveis envolvidas no problema em estudo e verificar o impacto na deformação da peça e, particularmente, no que diz respeito ao cumprimento das tolerâncias geométricas avaliadas anteriormente.

Existem várias variáveis envolvidas no sistema de aperto em estudo, força de indentação, localização dos grampos, área de contacto do indentador, entre outros. Como tal, optou-se por alterar a profundidade de indentação incrementalmente com o objetivo de averiguar o impacto deste parâmetro na deformação da peça e verificou-se, também, o efeito da alteração da localização das zonas de aperto com indentação na superfície da espiral da peça.

6.2 Alteração da Profundidade de Indentação

Primeiramente optou-se por verificar o impacto da alteração da profundidade de indentação na deformação da peça, uma vez que se percebeu, pela metodologia de cálculo da força de indentação, que esta variável influencia significativamente o valor da força exercida por cada grampo de aperto. Assim, determinou-se o valor da força de indentação para vários valores de profundidade de indentação inferiores a 1 mm (0,9; 0,8; 0,7; 0,6 e 0,5 mm), pois o valor da força de indentação diminui com a diminuição da profundidade de indentação (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 - Valores da força de indentação face à diminuição da profundidade de indentação.

Profundidade de Indentação [mm]	Força de Indentação [N]
1	3727
0,9	3019
0,8	2385
0,7	1826
0,6	1342
0,5	932

Para comparar os resultados obtidos, na simulação por elementos finitos, para as várias profundidades de indentação, mediu-se, através da ferramenta *Probe* do *software SolidWorks Simulation*, os deslocamentos nos dez pontos de interesse que percorrem a superfície de fundo da zona do topo da peça e verificou-se o deslocamento máximo na peça, para as diferentes configurações, como apresentado na Tabela 6.2. e na Figura 6.1.

No Anexo V podem-se consultar, com mais pormenor, as deformações a que a peça é sujeita para as várias simulações efetuadas com diferentes forças de indentação, calculadas em função da profundidade de indentação.

Tabela 6.2 - Medição dos deslocamentos impostos nos dez pontos de interesse com a alteração da profundidade de indentação.

Deslocamentos [μm]		Pontos de Interesse										Máximo [μm]
		11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	
Profundidade de Indentação	1 mm	11	13	16	14	5	3	3	5	5	4	18
	0,9 mm	8	8	12	8	3	3	3	4	4	4	15
	0,8 mm	7	5	10	7	2	2	2	3	3	3	11
	0,7 mm	5	4	7	4	2	1	2	3	3	3	9
	0,6 mm	4	3	5	3	1	1	1	2	2	2	6
	0,5 mm	2	2	4	3	1	1	1	1	1	1	5

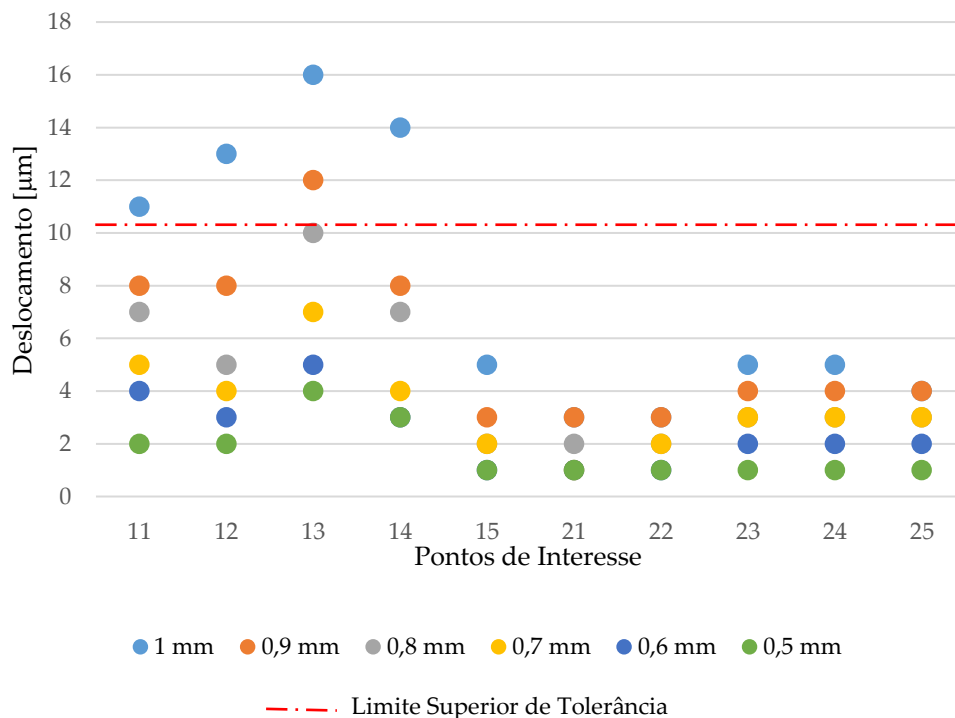


Figura 6.1 - Deslocamentos impostos nos dez pontos de interesse com a alteração da profundidade de indentação.

Verifica-se, pelos resultados obtidos, que a magnitude dos deslocamentos, segundo a direção do eixo vertical, diminui para profundidades de indentação inferiores a 1 mm, valor atualmente utilizado na empresa para a realização do aperto. Observando-se, pela Figura 6.1, que para valores de profundidade de indentação iguais ou inferiores a 0,7 mm obtêm-se, em todos os pontos de interesse, valores de deslocamentos inferiores ao limite superior de tolerância.

Deste modo, pode-se concluir que para uma força de indentação de 1826 N, correspondente a um valor de 0,7 mm de profundidade de indentação, é possível obter valores de deslocamentos admissíveis, isto é, com uma magnitude inferior ao valor de desvio superior de 10 μ m. Assim, comprova-se que a diminuição da profundidade de indentação provoca a redução significativa das deformações na peça. Sendo apenas necessário diminuir a profundidade de indentação em 0,3 mm, para que seja possível cumprir com os requisitos de projeto, no que diz respeito às tolerâncias geométricas de paralelismo.

Contudo deve ser garantido experimentalmente, que esta alteração na profundidade de indentação não provoca o escorregamento da peça, durante a operação de maquinação. Uma vez que a redução da profundidade de indentação e da força de aperto pode resultar numa indentação insuficiente para garantir o contacto entre os grampos de aperto e a superfície da peça indentada, durante toda a operação de maquinação.

6.3 Alteração da Localização das zonas de aperto

Verificou-se, ainda, o efeito da alteração da localização das zonas de aperto com indentação na superfície da espiral da peça no sentido dos ponteiros do relógio e no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, no sentido de averiguar se as posições escolhidas para a localização das zonas de aperto são as que provocam menores deformações na peça. Dado que um dos parâmetros mais críticos na configuração de um sistema de aperto é a localização das zonas de aperto, uma vez que tem a função de garantir o posicionamento isostático da peça durante toda a operação de maquinação.

Deste modo, o estudo deste parâmetro pode contribuir significativamente para a redução das deformações a que a peça é submetida, dada a importância da localização das zonas de aperto para o sucesso da operação. Para comparar os resultados obtidos através da variação da localização das zonas de aperto com os resultados obtidos anteriormente para a configuração de aperto utilizada pela empresa, mediu-se os deslocamentos, a que a peça é submetida, nos dez pontos de interesse, na direção do eixo vertical (Y).

Primeiramente, alterou-se o posicionamento das áreas de contacto no sentido dos ponteiros do relógio para diversos ângulos (10° , 20° , 30° , 40° , 50° e 60°), apresentado detalhadamente no Anexo VI.

Com esta alteração verificou-se que as deformações para uma rotação de 30° no sentido dos ponteiros dos relógios apresentavam uma ligeira melhoria na zona crítica da peça (pontos de interesse 12, 13 e 14), com a diminuição dos deslocamentos. No entanto, observou-se um aumento muito significativo do valor dos deslocamentos na zona de aperto mais afastada do centro da peça, como ilustrado na Figura 6.2. Verificando-se deformações máximas de aproximadamente $22\text{ }\mu\text{m}$, superior ao valor de deformação máxima de $18\text{ }\mu\text{m}$, observado na simulação da configuração de aperto utilizada pela empresa. Assim, esta alteração não permite melhorar a condição de aperto, uma vez que existe um aumento significativo das deformações na peça.

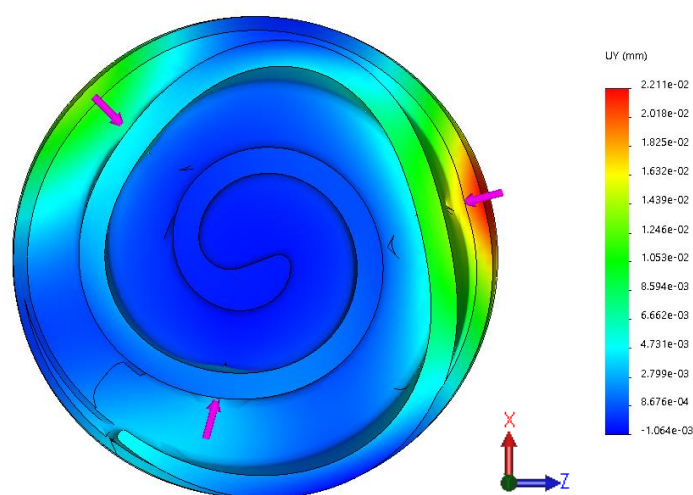


Figura 6.2 - Magnitude de deslocamentos medidos segundo a direção Y, através da rotação das áreas de aperto de um ângulo de 30° no sentido dos ponteiros do relógio.

Deste modo, realizou-se a rotação da localização das forças de indentação no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio para os ângulos de 200°, 230°, 260° e 290° (em pormenor no Anexo VII). Verificou-se que as deformações reduzem à medida que as forças de indentação são colocadas mais perto do centro da peça, até ao ângulo de 260°. A partir desta amplitude observou-se uma estabilização das deformações, no que concerne à superfície de fundo da zona do topo da peça. A deformação máxima na superfície de fundo da zona do topo da peça é de 5 μm , como se ilustra na Figura 6.3, valor muito inferior ao verificado na simulação realizada para a condição de aperto utilizada pela empresa.

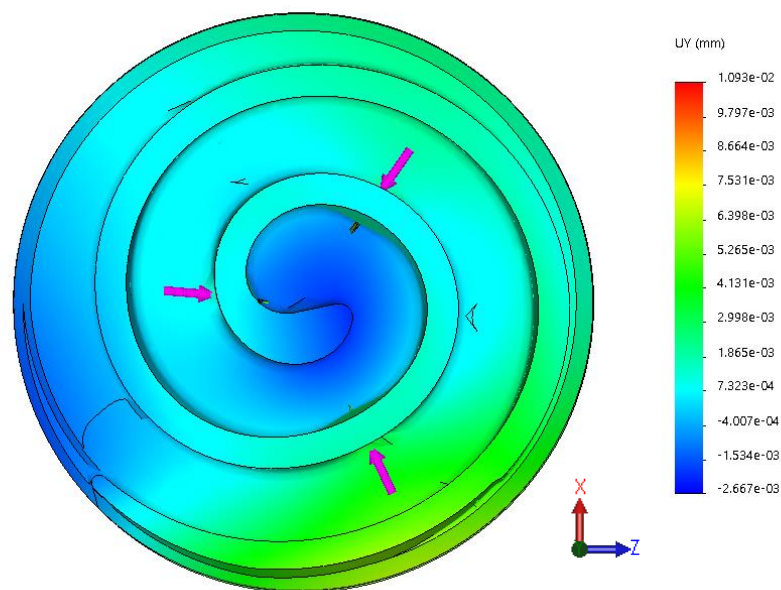


Figura 6.3 - Magnitude de deslocamentos para uma rotação da localização das zonas de aperto num ângulo de 260° no sentido contrário aos ponteiros do relógio.

Assim, pode-se concluir, através das simulações efetuadas, que a rotação das zonas de aperto no sentido dos ponteiros do relógio, apesar de reduzir um pouco as deformações na zona crítica, aumenta as deformações na zona de aperto mais afastada do centro da peça. Contudo, na simulação da rotação das zonas de aperto no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, observou-se que as deformações diminuem substancialmente para uma rotação de 260 graus. O que se deve à aproximação das forças do centro da peça, que constitui uma zona que apresenta maior rigidez, devido à geometria deste componente.

Desta forma, comprova-se que a alteração relativa à localização das zonas de aperto, influencia de forma muito significativa as deformações observadas na

peça. Particularmente, a rotação das zonas de aperto num ângulo de 260 graus no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio.

Quanto à exequibilidade desta alteração, é importante verificar experimentalmente. Contudo, não é expectável que apareçam vibrações durante a operação de maquinação, uma vez que o aperto da peça seria realizado numa zona da mesma que apresenta maior rigidez. No que se refere ao eixo de rotação da peça é esperado que se mantenha na mesma posição, uma vez que se manteve o espaçamento de 120 graus entre a localização das zonas de aperto. Quanto ao contacto entre os grampos e a peça, ao longo da operação, é expectável que se mantenha, uma vez que não se alterou a profundidade de indentação inicial definida pela empresa, igual a 1 mm.

7 Nova Solução de Aperto para a OP10

A empresa pretende melhorar o processo produtivo do componente *Orbiting Scroll*, pelo que durante o período de realização desta dissertação, foi desenvolvido e implementado um novo sistema de aperto para a primeira operação de maquinação do componente em estudo, no sentido de minimizar as deformações na peça e melhorar a precisão do processo de maquinação.

De acordo com as informações facultadas pela empresa, o aperto passa a ser realizado por uma bucha manual, modelo JN06 da *Kitagawa*, com três grampos de aperto (Figura 7.1). Assim, o aperto da peça passa a ser realizado manualmente utilizando uma chave dinamométrica, calibrada para 50 Nm. Este valor foi estimado pela empresa, com base noutros processos produtivos que utilizam o mesmo modelo de bucha de aperto.

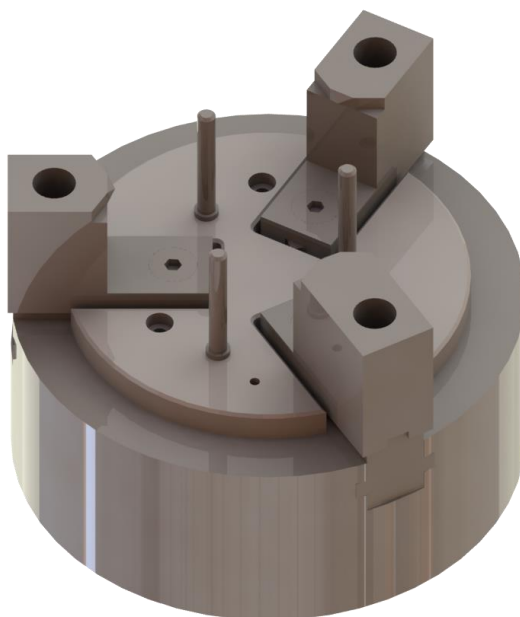


Figura 7.1 - Bucha de aperto manual JN06, da *Kitagawa*.

O aperto da peça é realizado por indentação, com a diferença, para o sistema descrito em 3.5.1, que a ponta do indentador apresenta uma geometria em pirâmide quadrangular (Figura 7.2). Pelo que se pode prever que a geometria indentada na superfície da peça seja igualmente em pirâmide, com uma área projetada quadrangular.

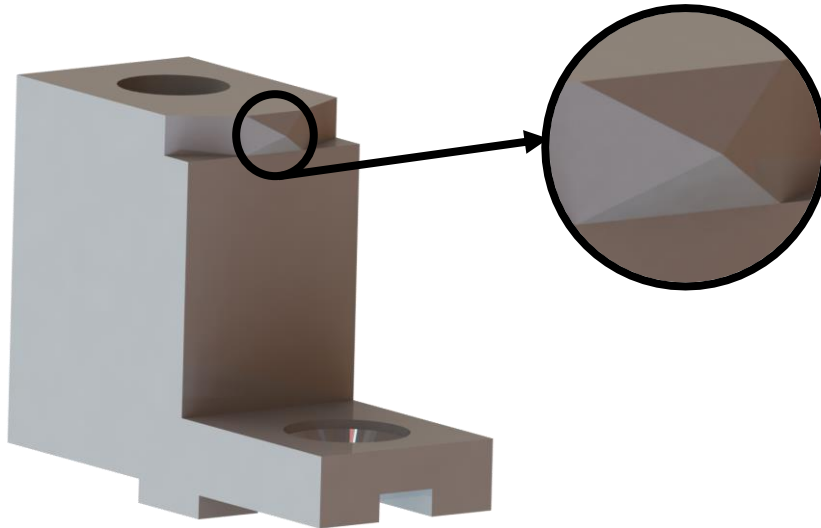


Figura 7.2 - Grampo de aperto da série JN da *Kitagawa*, com ampliação na zona do indentador.

Na Figura 7.3 está ilustrada a operação de aperto com o componente em estudo localizado corretamente na bucha de aperto, através de três pinos localizadores que asseguram que a peça é colocada na bucha de aperto sempre na mesma posição, garantido a correta localização e orientação da peça no sistema de aperto.



Figura 7.3 - Operação de aperto na bucha manual.

Relativamente à localização da zona de aperto, particularmente da área de indentação, esta encontra-se distanciada de 6,5 mm do fundo da peça, como ilustrado na Figura 7.4.



Figura 7.4 - Localização da zona de aperto.

A empresa implementou esta nova solução de aperto, contudo não elaborou medições através da CMM para verificar se esta nova solução permite diminuir os desvios relativos às tolerâncias de paralelismo das superfícies de fundo e de topo da espiral, como analisado no capítulo 4. Contudo, este sistema de aperto foi testado e foi medido o perfil de indentação com as condições de aperto descritas acima, tendo-se verificado boas condições de maquinação para uma profundidade de indentação de aproximadamente 0,7 mm (ver Anexo IX). Na Figura 7.5 observa-se a marca deixada pelo sistema de indentação na superfície da peça.



Figura 7.5 - Marca deixada pelo sistema de aperto com indentador geometria em pirâmide.

Este resultado, obtido pela empresa, mostra que a simulação efetuada através do *software SolidWorks Simulation* está muito próxima da realidade, uma vez

que no Capítulo 6.2 também se verificou que uma redução da profundidade de indentação para um valor de 0,7 mm, permite diminuir substancialmente as deformações na peça. Realçando-se, assim, a importância da utilização de programas computacionais que combinam a modelação tridimensional e a simulação numérica, dado que constituem uma mais valia para as empresas, na medida em que permitem prever com alguma precisão as deformações a que uma peça está sujeita e agir rapidamente para minimizar estas deformações, de forma a melhorar o grau de precisão do processo produtivo, sem que seja necessário realizar um elevado número de ensaios experimentais.

Contudo, continua a ser relevante para a empresa simular a nova configuração do sistema de aperto num *software* de elementos finitos, no sentido de estimar a deformação causada e comparar os resultados obtidos com os relatórios de medição da CMM. Esta metodologia permitiria garantir que esta nova solução para o sistema de aperto permite, efetivamente, melhorar a precisão da operação, através da redução das deformações na peça.

8 Conclusão e Trabalhos Futuros

8.1 Conclusão

Nesta dissertação, que aborda a temática dos sistemas de aperto giratórios, estudou-se o impacto que a força de aperto, com indentação de material, tem sobre as deformações produzidas numa peça, particularmente no que respeita à influência, direta e indireta, no cumprimento das tolerâncias geométricas de paralelismo.

O estudo efetuado teve por base um caso de estudo real, a peça *Orbiting Scroll* de um modelo de compressor. Em particular, pela análise da configuração de aperto utilizado para a realização da primeira operação de maquinação desta peça. A metodologia utilizada passou pela estimação da força de indentação que cada grampo de aperto aplica na superfície da espiral da peça para penetrar numa profundidade aproximadamente igual a um milímetro. Através do cálculo desta força, efetuou-se a simulação da condição de aperto a que a peça é submetida, através de um *software* de elementos finitos, *SolidWorks Simulation*. Compararam-se os resultados obtidos na simulação com os dados fornecidos pela empresa, relativos aos relatórios de medição de tolerâncias dimensionais e geométricas.

Nesta comparação verificou-se que os resultados obtidos na simulação, relativamente aos deslocamentos nos pontos de interesse, se enquadravam na gama de valores em que variavam os deslocamentos nos relatórios fornecidos, em cada ponto de interesse. Pelo que se pôde concluir que existe concordância

nos resultados, relativamente às zonas onde existem as maiores e as menores deformação e quanto às amplitudes das mesmas. Assim, é possível associar a magnitude da força de indentação às deformações verificadas na superfície de fundo da zona do topo da peça. Podendo-se tomar como válida a abordagem tomada para a estimação da força de indentação exercida por cada grampo, visto que se verificou que existe semelhança entre os dados adquiridos através dos relatórios de medição da CMM e os resultados obtidos na simulação pelo MEF.

Concluiu-se, também, que o incumprimento das tolerâncias geométricas de paralelismo pode estar associado às deformações a que a peça é sujeita pelo sistema de aperto utilizado, uma vez que existe concordância nos resultados obtidos, no que concerne às deformações que ocorrem neste componente.

Face aos resultados obtidos através dos meios computacionais, alterou-se as condições de aperto inicialmente estabelecidas, com o objetivo de encontrar novas configurações de aperto que provoquem menores deformações na peça. No modelo criado para a realização da simulação da configuração inicial de aperto, alterou-se alguns parâmetros no sentido de estimar o seu impacto nas deformações verificadas na peça.

Neste estudo de melhoria da condição de aperto, verificou-se que as alterações, no que concerne à profundidade de indentação e à localização das zonas de aperto, permitem diminuir significativamente as deformações na peça, quando comparado com a simulação efetuada para o sistema de aperto utilizado pela empresa. Verificou-se que uma redução da profundidade de indentação de 0,3 mm, ou seja, para um valor de 0,7 mm, permite diminuir substancialmente as deformações na peça. Observou-se, ainda, que uma rotação das zonas de aperto num ângulo de 260 graus, no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, para uma zona mais rígida da peça, permite, também, uma redução considerável das deformações na peça. De acordo com os dados recolhidos nas simulações realizadas, esta redução das deformações, verificada através das alterações efetuadas, permite que sejam cumpridas as especificações do projeto, particularmente no que à tolerância dimensional relativa aos “*Z Value Points*”.

Procurou-se, também, verificar o impacto da alteração da distância da zona da aperto ao fundo da peça. Contudo, verificou-se que a distância utilizada pela empresa (3 mm) é a solução que menos deformações provoca na peça, uma vez

que a diminuição deste valor não é aconselhável, pois tornaria inviável o aperto da peça. Com esta abordagem pode-se concluir, também, que a utilização de um *software* que combina a modelação tridimensional e a simulação numérica constitui uma mais valia para as empresas. Uma vez que, através da simulação da configuração do sistema de aperto, se obteve resultados que permitem melhorar as condições de aperto, sem que seja necessário efetuar testes experimentais, que representam uma fonte significativa de desperdício de recursos.

Por fim, abordou-se a nova solução para o sistema de aperto da OP10, desenvolvida pela empresa para melhorar a precisão deste processo produtivo. A empresa optou por implementar uma bucha de aperto manual com 3 grampos de aperto para indentação. Num estudo realizado ao novo sistema de aperto, verificou-se que, para as condições de aperto estabelecidas e testadas, o indentador perfura a superfície da peça numa profundidade igual a 0,7 mm. Este resultado mostra a importância do trabalho desenvolvido, uma vez que através da alteração das condições de aperto na simulação se verificou que uma profundidade de indentação de 0,7 mm permite diminuir substancialmente as deformações na peça e cumprir as tolerâncias especificadas no projeto.

Assim, demonstrou-se, ainda, a importância da fase do projeto, nomeadamente no que se refere às tecnologias de fabrico, uma vez que permite através da utilização de meios computacionais melhorar os sistemas utilizados, com o objetivo de “fazer bem à primeira”. Através destas metodologias, relacionadas com a engenharia simultânea, as empresas conseguem reduzir o tempo de produção e o custo do produto.

Face às conclusões obtidas com esta dissertação, realça-se, sobretudo, a importância da utilização de programas computacionais que combinam a modelação tridimensional e a simulação numérica, uma vez que constituem uma mais valia para as empresas, na medida em que permitem prever com alguma precisão as deformações a que uma peça está sujeita. Para as empresas, esta ferramenta pode ser fundamental para evitar o desperdício de recursos em vários ensaios experimentais, uma vez que é possível, através deste método computacional, atribuir valores às diversas variáveis envolvidas e testar o impacto das diferentes configurações. Admitindo, também, diminuir os tempos de preparação e implementação de um processo de industrialização de um produto. Assim, ressalva-se

a importância da implementação de medidas de melhoria contínua e engenharia simultânea, no sentido de garantir a aptidão dos processos de fabrico e o cumprimento dos requisitos determinados pelos vários departamentos da empresa, em conjunto.

A elaboração desta dissertação permitiu ao estudante adquirir experiência através da resolução de um problema real de uma empresa, enquadrada na indústria do ramo automóvel. Possibilitou, também, pesquisar e relacionar conceitos e processos não abordados durante o período de formação, nomeadamente relacionados com os sistemas de aperto.

8.2 Trabalhos Futuros

A simulação realizada através do *software* de elementos finitos *SolidWorks Simulation* permitiu medir e verificar as deformações a que a peça é submetida pelo sistema de aperto, mais especificamente da força de indentação utilizada.

Contudo, os resultados obtidos tiveram por base os pressupostos e cálculos tomados na metodologia descrita na secção 5.3, que permitem obter apenas uma estimação da força de indentação. Como tal, este resultado tem associado uma incerteza desconhecida, que pode dar origem à propagação de erros ao longo desta análise. Assim, apesar da importância deste tipo de *software* para a estimação de resultados relacionados com as deformações a que um componente está sujeito, uma confirmação experimental dos resultados confere maior confiabilidade ao estudo. Assim, como proposta para trabalho futuro propõe-se a execução de um teste experimental que permita efetuar a medição das deformações e esforços envolvidos na operação de aperto, através da aplicação, por exemplo, de extensómetros e células de carga. Esta medição teria como principal objetivo verificar os resultados obtidos pela simulação efetuada através de métodos computacionais.

O desenvolvimento de estudos mais aprofundados na temática dos sistemas de aperto, nomeadamente relativo às relações que existem entre as várias variáveis e parâmetros, tais como a localização das zonas de aperto, a força de aperto, o momento de aperto, número de grampos de aperto, entre outros, trata-

se de uma necessidade iminente, uma vez que foi encontrada, na revisão da literatura, muito pouca informação neste âmbito. Assim, é necessário encorajar o desenvolvimento de mais trabalhos que permitam evoluir e melhorar o conhecimento teórico sobre este tema. Deste modo será possível desenvolver mais estudos experimentais neste âmbito, de forma mais sustentada e uniforme entre estudos.

Por fim, propõe-se o desenvolvimento de simulações com maior grau de precisão, nomeadamente através de programas computacionais mais especializados em análises por elementos finitos, por exemplo o *software* ANSYS. Este *software* pode permitir obter resultados com maior grau de precisão, nomeadamente no que se refere à construção da malha de elementos finitos, por exemplo utilizando elementos quadrangulares. A utilização deste programa possibilita, ainda, o desenvolvimento de outro tipo de análises dinâmicas e de otimização, que podem permitir o desenvolvimento de estudos mais abrangentes. Assim, é fundamental continuar a desenvolver metodologias de previsão das deformações criadas pelas configurações dos sistemas de aperto, nomeadamente no impacto que estas têm sobre o grau de precisão da operação de fabrico, que está diretamente relacionado com a precisão das tolerâncias especificadas no projeto.

Bibliografia

- Albuquerque, F. (2018). *Estudo do Aperto para Maquinação de Elevada Precisão – Caso da Espiral de um Compressor*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Dissertação de Mestrado.
- Broitman, E. (2017). Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview. *Tribology Letters*, 65, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0805-5>
- Cabrita, T. M. M. (2016). *Metodologia de Apoio à Seleção de Sistemas de Aperto Giratórios para Operações de Maquinação*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Dissertação de Mestrado.
- Cardoso, J. B. (2016). Tensões principais. Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Cardoso, J. B. (2018). Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica (Apontamentos Didáticos). Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

- Carrier. (2004). HIGH EFFICIENCY COMPRESSION FOR COMMERCIAL AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. Syracuse, New York.
- Cheng, Y.-T., & Cheng, C.-M. (2000). What is indentation hardness? *SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY*, 417–424. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.32329>
- Coelho, P. (2017). *Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica*. (Apontamentos Didáticos) Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Estrems, M, Arizmendi, M., Zabaleta, A. J., & Gil, A. (2015). Numerical Method to Calculate the Deformation of Thin Rings during Turning Operation and its Influence on the Roundness Tolerance. *Procedia Engineering*, 132, 872–879. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.572>
- Estrems, M, Cumbicus, W. E., Francisco, O. De, Sánchez, H. T., Estrems, M., Carrero-blanco, J. Sánchez, H. T. (2017a). Contact mechanics applied to the machining of thin rings. *Procedia Manufacturing*, 13, 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.138>
- Estrems, M, Cumbicus, W. E., Francisco, O. De, Sánchez, H. T., Estrems, M., Carrero-blanco, J. Sánchez, H. T. (2017b). Contact mechanics applied to the machining of thin rings Costing models for capacity optimization in Industry ipu Trade-off. *Procedia Manufacturing*, 13, 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.138>
- Estrems, Manuel, Cumbicus, W. E., Zabaleta, A. J., & Arizmendi, M. (2017). Measuring clamping forces during turning via a sensorised steel ring. *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems*, 10, 101–114. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2017.084798>

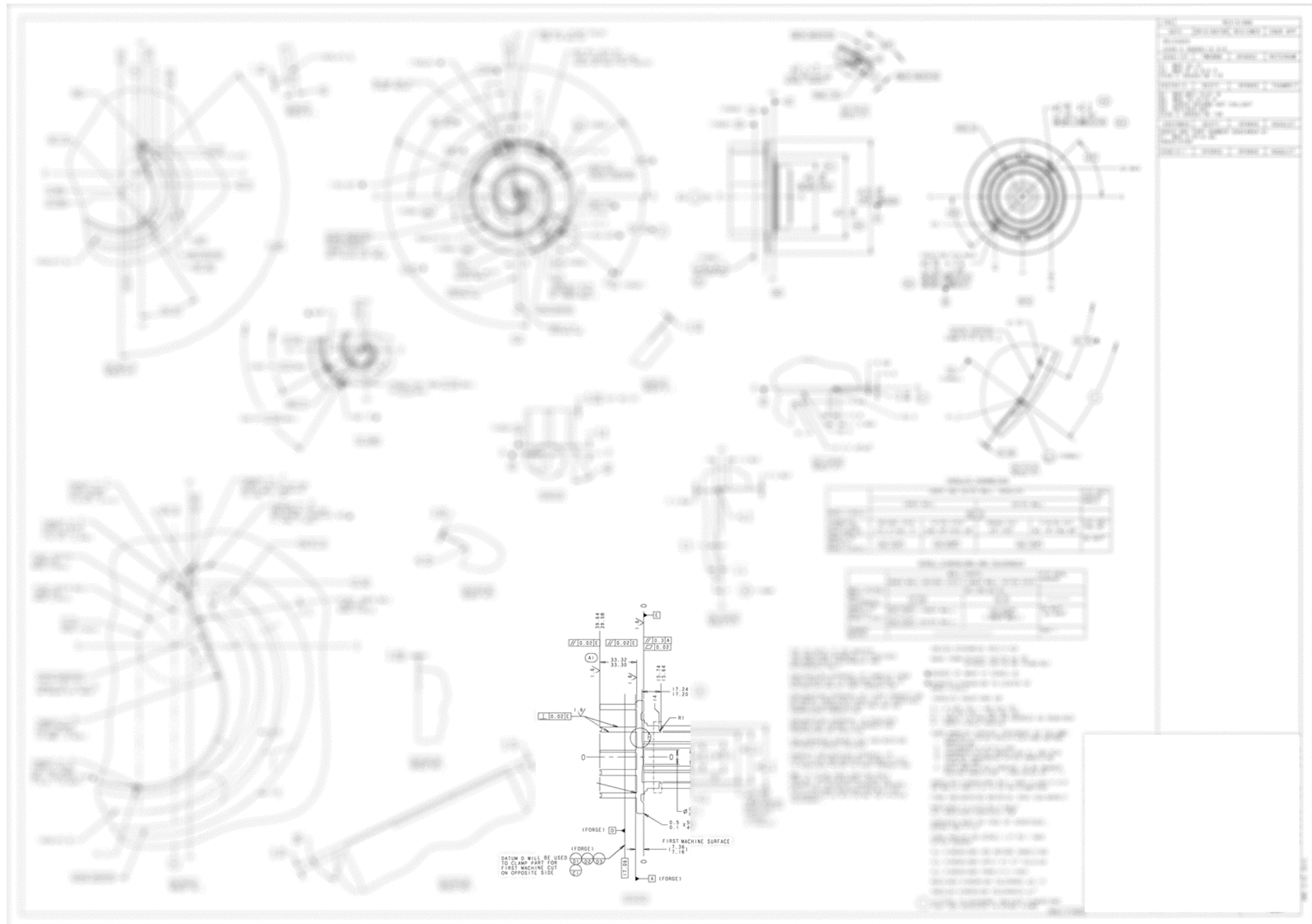
- Georgiadis, A., Eggebrecht, M., & Wagner, T. (2014). Strategies for correcting the workpiece deformation during the manufacturing at the milling process. *Key Engineering Materials*, 613, 324–327. <https://doi.org/10.5162/sensor2013/B8.2>
- Strategies
- ISO. (2014). 6506 - 1: Metallic materials — Brinell hardness test. In *INTERNATIONAL STANDARD ISO 6506-1* (p. 22).
- Knape, S., Konigs, M., Epple, A., & Brecher, C. (2019). Increasing Accuracy of Material Removal Simulations by Modeling Workpiece Deformation to Clamping Forces. *Advances in Production Research*, 72–80. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-03451-1_8
- Meyer, R. T., & Liou, F. W. (2010). Fixture analysis under dynamic machining. *International Journal of Production Research*, 35(5), 1471-. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/002075497195425>
- Mourão, A. (2004). Tolerâncias geométricas - Interpretação, princípios e métodos de verificação. (Apontamentos Didáticos) Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Mourão, A. J. F. (1999). Introdução à Engenharia Simultânea e ao Projecto para Fabrico e Montagem. (Apontamentos Didáticos) Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Nategh, M. J., & Parvaz, H. (2018). Development of computer aided clamping system design for workpieces with freeform surfaces ☆. *Computer-Aided Design*, 95, 52–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.10.003>
- Northwest Equipment Ltd. (2015). Rotary Scroll Compressors - Northwest Equipment Ltd. Retrieved September 3, 2019, from <http://www.nwequipltd.com/scroll-compressors/>

- Oliver, W. C., & Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7, 20. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
- Patalas, A., Regus, M., & Peta, K. (2018). Studies of thin-walled parts deformation by grip- ping force during turning process on an example of bearing ring. *MATEC Web of Conferences*, 244, 4–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/mateconf/201824402010>
- ROHM. (2014). *Lathe Chucks - Independent Chucks* (Catálogo). Sontheim/Brenz.
- Sun, Y., & Jiang, S. (2018). Predictive modeling of chatter stability considering force-induced deformation effect in milling thin-walled parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 135, 38–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.08.003>
- Wang, J., Zhang, J., Feng, P., & Wu, Z. (2015). Modeling and simulation for the critical bending force of power chucks to guarantee high machining precision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79, 1081–1094. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6887-7>

Anexos

Anexo I – Desenho técnico da peça em estudo, <i>Orbiting Scroll</i>	87
Anexo II – Relatório de medição de tolerâncias dimensionais e geométricas...	89
Anexo III - Tabela de conversão de valores de dureza para ligas de alumínio.	90
Anexo IV - Tabela com variáveis e fórmulas com respeito à metodologia do teste de Brinell.	91
Anexo V – Resultados obtidos através da variação incremental da profundidade de indentação	92
Anexo VI – Magnitude de deslocamentos medidos segundo a direção vertical (Y), através da rotação das áreas de aperto no sentido dos ponteiros do relógio.	95
Anexo VII – Magnitude de deslocamentos medidos segundo a direção vertical (Y), através da rotação das áreas de aperto no sentido contrário aos ponteiros do relógio.....	98
Anexo VIII – Especificações técnicas da bucha de aperto JN06 do fabricante <i>Kitagawa</i>	100
Anexo IX – Perfil de indentação medido na bucha de aperto manual, modelo JN06 da <i>Kitagawa</i>	101

Anexo I – Desenho técnico da peça em estudo, *Orbiting Scroll*.



Anexo II – Relatório de medição de tolerâncias dimensionais e geométricas

Da Excello: Furo H e Ajustes em -Polares-

-56- Diameter_Datum H	D	3.0314	3.0000	0.1000	-0.1000	0.0314	--
-59- Position_Datum H	Po2d	0.0214	0.0000	0.0600		0.0214	--
	X	39.9757	39.9860			-0.0103	
	Y	-23.0888	-23.0860			-0.0028	
Ajuste em R	R	46.1644	46.1719	0.0300	-0.0300	-0.0075	-
Ajuste em C	A	329.9905	330.0000	0.0350	-0.0350	-0.0095	--

Alturas e Paralelismos

-53- Altura Topo	Z	39.6194	39.6100	0.0300	-0.0300	0.0094	--
-51- Paralelismo Topo	Par	0.0290	0.0000	0.0200		0.0290	0.0090
-54- Altura Parede	CartDist	33.3086	33.3100	0.0100	-0.0100	-0.0014	-
-44- Paralelismo Fundo	Par	0.0266	0.0000	0.0200		0.0266	0.0066

Alturas Steps

-81- Tip Relief	CartDist	0.0444	0.0500	0.0150	-0.0150	-0.0056	--
-74- Tip Groove	CartDist	0.2174	0.2000	0.0200	-0.0200	0.0174	---
-55- Tip Seal	CartDist	1.4420	1.4450	0.0200	-0.0200	-0.0030	-
-45- Plate Recess	CartDist	0.2700	0.2750	0.0150	-0.0150	-0.0050	--
-58- Cut Relief	CartDist	0.0481	0.0400	0.0050	-0.0050	0.0081	0.0031

Desvios de Forma

BladeRadius	R	50.3352	50.3500	0.0750	-0.0750	-0.0148	-
-72- TipSealProfile	CurvForm	0.6132	0.0000	0.0500	-0.0500	0.6132	0.5340
-62 71- Involute Top -0.04EFH-	CurvForm	0.0282	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0282	---
-63- BestFit Topo -0.02EF-	CurvForm	0.0251	0.0000	0.0100	-0.0100	0.0251	0.0076
-62 71- Involute Bot -0.04EFH-	CurvForm	0.0378	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0378	---
-63- BestFit Bot -0.02EF-	CurvForm	0.0459	0.0000	0.0100	-0.0100	0.0459	-0.0156
-66- Blade Profile	CurvForm	0.5200	0.0000	0.0750	-0.0750	0.5200	-0.4450

Paredes Involuta

-73- NarizLinha	Strght	0.0086	0.0000	0.0300		0.0086	--
-49- ParedeLinha-	Strght	0.0015	0.0000	0.0200		0.0015	-
Z Value_Point11	Z	6.5821	6.5750	0.0100	-0.0100	0.0071	---
Z Value_Point12	Z	6.5920	6.5750	0.0100	-0.0100	0.0170	0.0070
Z Value_Point13	Z	6.5956	6.5750	0.0100	-0.0100	0.0206	0.0106
Z Value_Point14	Z	6.5892	6.5750	0.0100	-0.0100	0.0142	0.0042
Z Value_Point15	Z	6.5859	6.5750	0.0100	-0.0100	0.0109	0.0009
Z Value_Point21	Z	6.3082	6.3000	0.0100	-0.0100	0.0082	---
Z Value_Point22	Z	6.3036	6.3000	0.0100	-0.0100	0.0036	--
Z Value_Point23	Z	6.2933	6.3000	0.0100	-0.0100	-0.0067	---
Z Value_Point24	Z	6.2922	6.3000	0.0100	-0.0100	-0.0078	----
Z Value_Point25	Z	6.3016	6.3000	0.0100	-0.0100	0.0016	-

Anexo III - Tabela de conversão de valores de dureza para ligas de alumínio.

Table F.5 — Aluminium and its alloys (BS 860:1967, Table 1)

HV10	HB ($F/D^2 = 5$ or 10)	HRB
210	199,5	95,7
205	194,8	94,8
200	190,0	93,8
195	185,3	92,7
190	180,5	91,6
185	175,8	90,4
180	171,0	89,2
175	166,3	87,9
170	161,5	86,5
165	156,8	85,0
160	152,0	83,4
155	147,3	81,8
150	142,5	80,0
145	137,8	78,1
140	133,0	76,1
135	128,3	73,9
130	123,5	71,5
125	118,8	69,0
120	114,0	66,3
115	109,3	63,3
110	104,5	60,0
105	99,8	56,4
100	95,0	52,5
98	93,1	50,8
96	91,2	49,1
94	89,3	47,2
92	87,4	45,3
90	85,5	43,3
88	83,6	41,3
86	81,7	39,1
84	79,8	36,8
82	77,9	34,4
80	76,0	31,9

Anexo IV - Tabela com variáveis e fórmulas com respeito à metodologia do teste de Brinell.

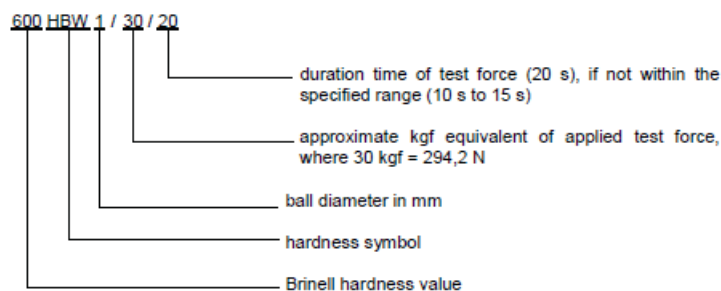
ISO 6506-1:2014(E)

Table 1 — Symbols and abbreviated terms

Symbol/ abbreviated term	Definition	Unit
D	Diameter of the ball	mm
F	Test force	N
d	Mean diameter of the indentation $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$	mm
d_1, d_2	Indentation diameters measured at approximately 90°	mm
h	Depth of indentation $h = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right)$	mm
HBW	Brinell hardness = constant (see Note) $\times \frac{\text{Test force}}{\text{idealized surface area of indentation}}$ $HBW = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right)}$	
$0,102 \times F/D^2$	Force-diameter index	
NOTE constant = $0,102 \approx \frac{1}{9,806\,65}$, where 9,806 65 is the conversion factor from kgf to N.		

4.2 The following is an example of the designation of Brinell hardness, HBW.

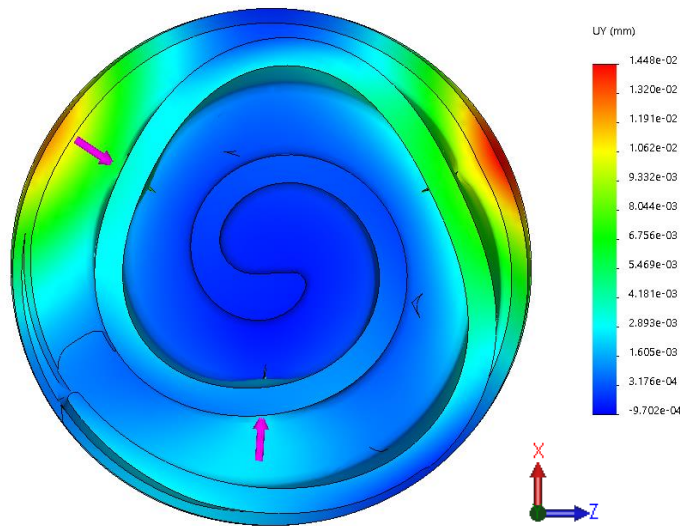
EXAMPLE



NOTE In former editions of this International Standard, when use of a steel ball was permitted, the Brinell hardness was denoted by HB or HBS.

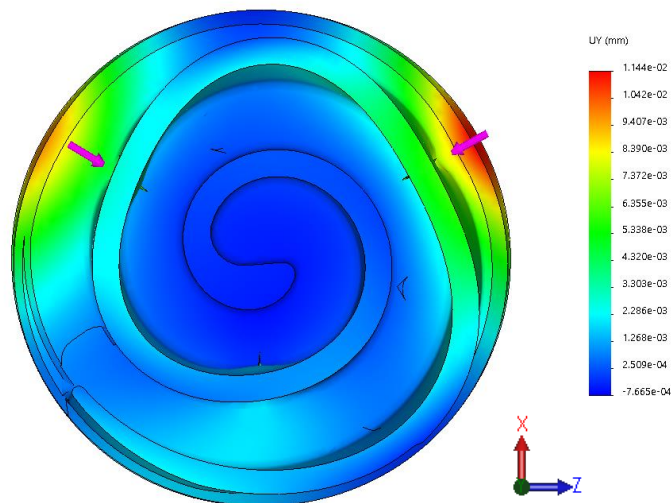
Anexo V – Resultados obtidos através da variação incremental da profundidade de indentação

- Profundidade de indentação de 0,9 mm



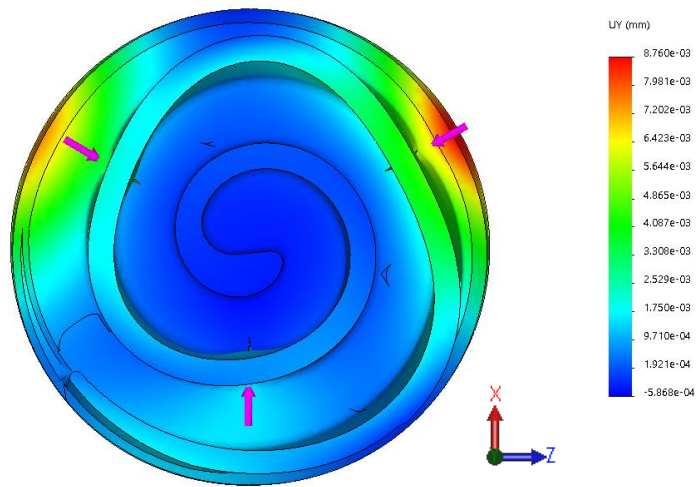
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	8	8	12	8	3	3	3	4	4	4	15

- Profundidade de indentação de 0,8 mm



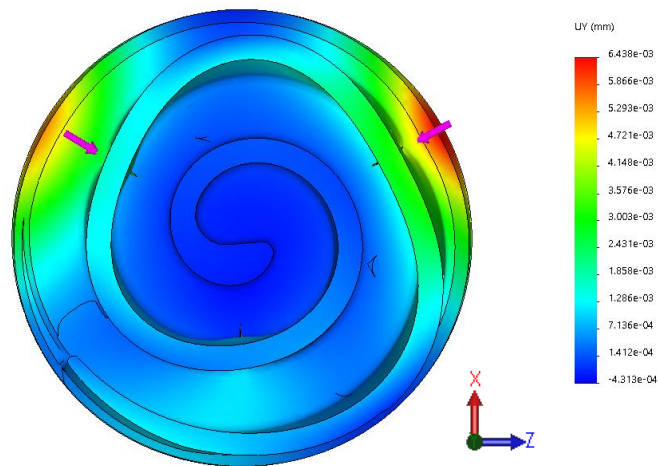
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	7	5	10	7	2	2	2	3	3	3	11

- Profundidade de indentação de 0,7 mm



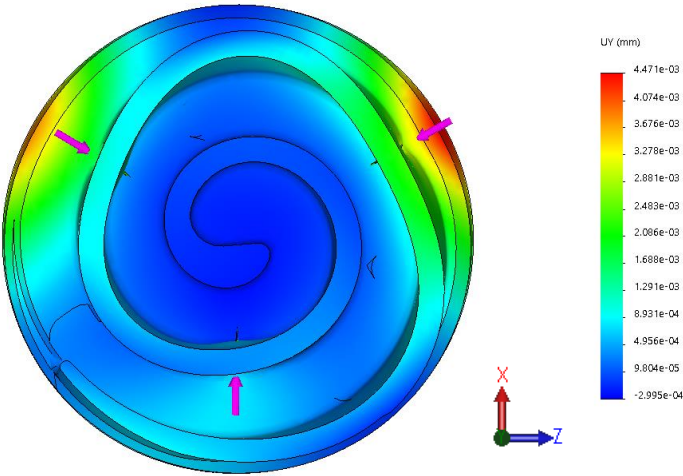
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	5	4	7	4	2	1	2	3	3	3	9

- Profundidade de indentação de 0,6 mm



Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	4	3	5	3	1	1	1	2	2	2	6

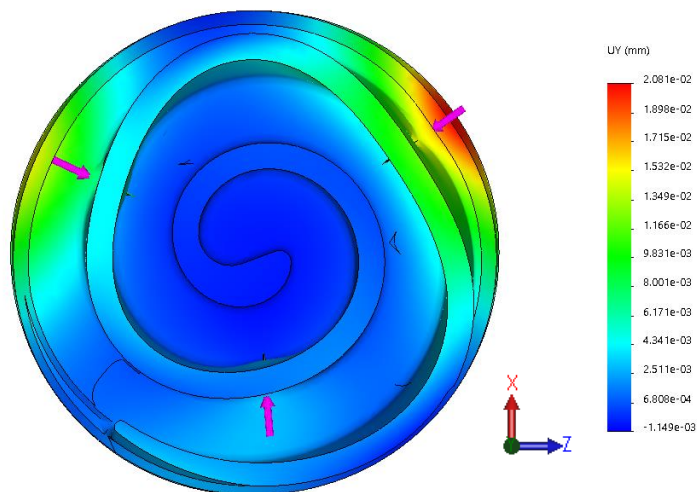
- Profundidade de indentação de 0,5 mm



Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	2	2	4	3	1	1	1	1	1	1	5

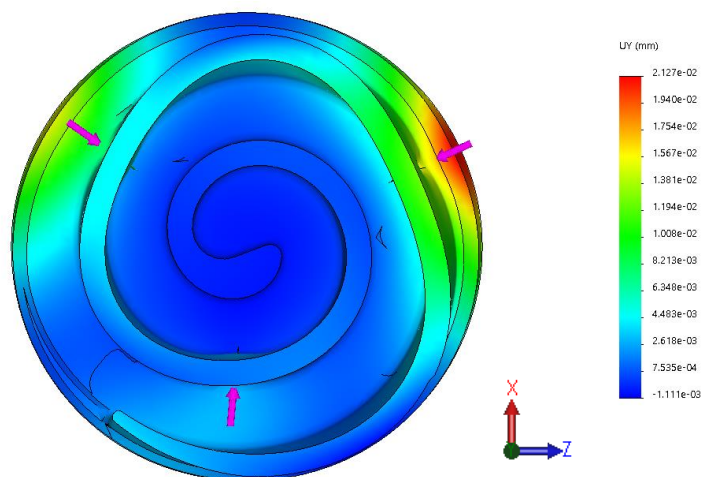
Anexo VI – Magnitude dos deslocamentos medidos segundo a direção vertical (Y), através da rotação das áreas de aperto no sentido dos ponteiros do relógio.

- Rotação de 10°



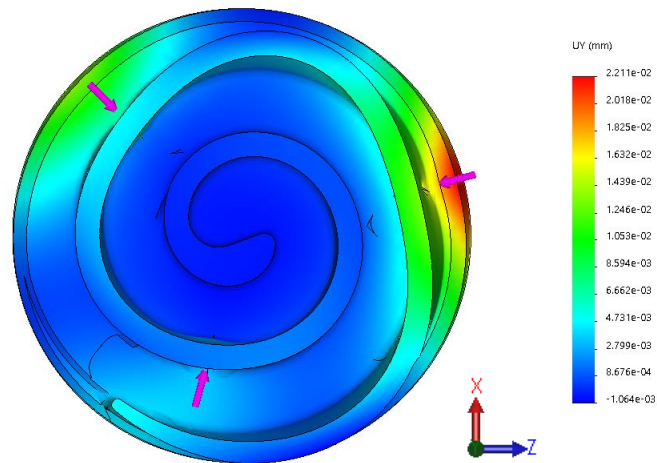
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	7	7	14	8	2	2	4	5	5	5	21

- Rotação de 20°



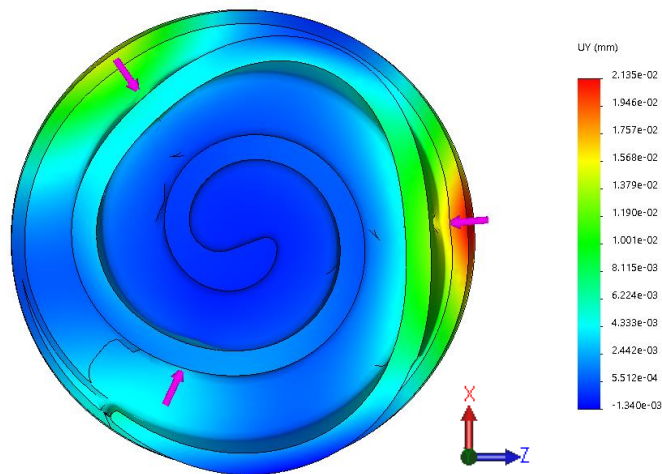
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	8	8	15	8	3	3	5	5	5	5	21

- Rotação de 30°



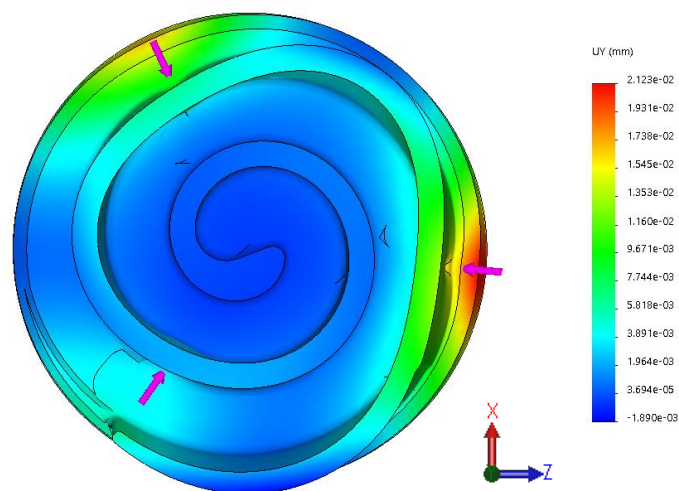
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	5	8	11	5	2	3	5	2	5	5	22

- Rotação de 40°



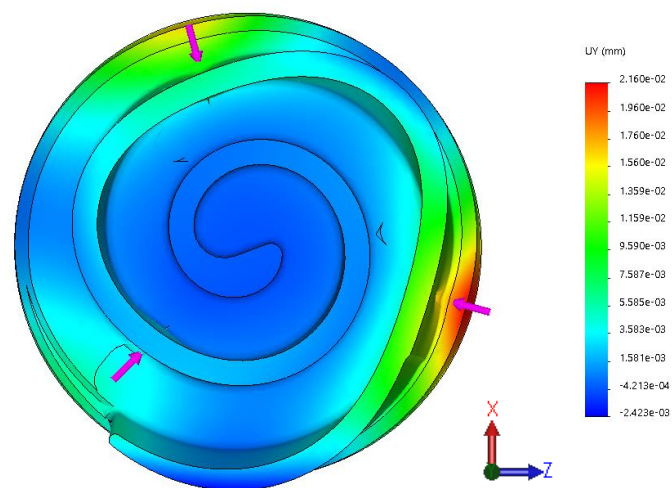
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	4	16	8	3	4	5	5	2	5	5	21

- Rotação de 50°



Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	4	17	11	2	4	5	2	4	5	5	21

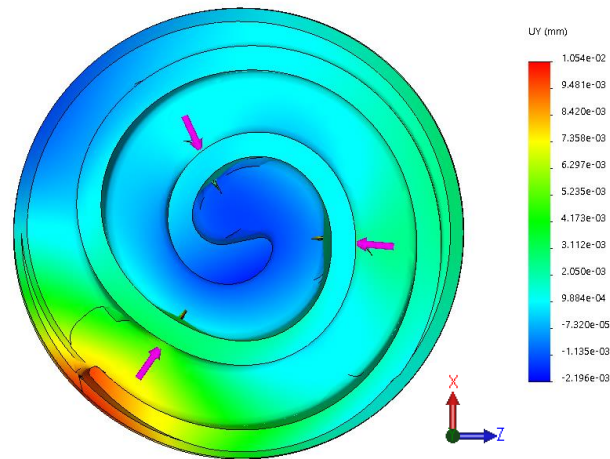
- Rotação de 60°



Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	4	18	12	3	5	5	4	4	5	5	22

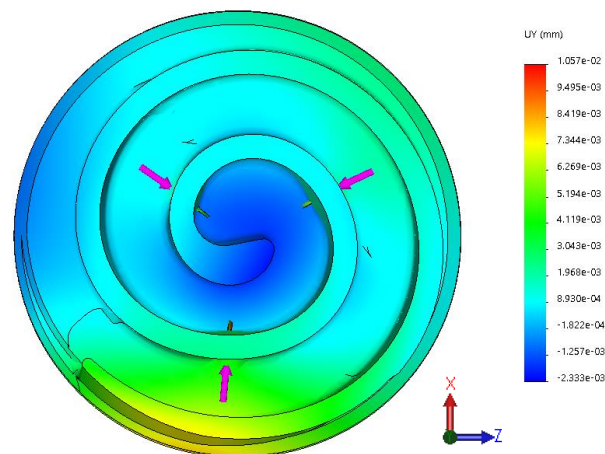
Anexo VII – Magnitude dos deslocamentos medidos segundo a direção vertical (Y), através da rotação das áreas de aperto no sentido contrário aos ponteiros do relógio.

- Rotação de 200°



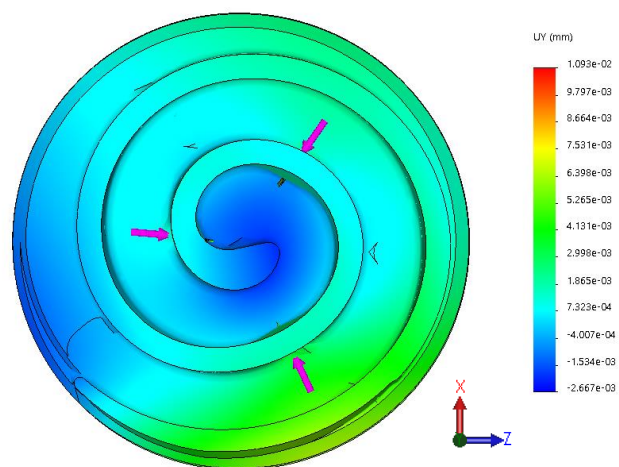
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	1	1	1	3	9	9	6	2	3	2	11

- Rotação de 230°



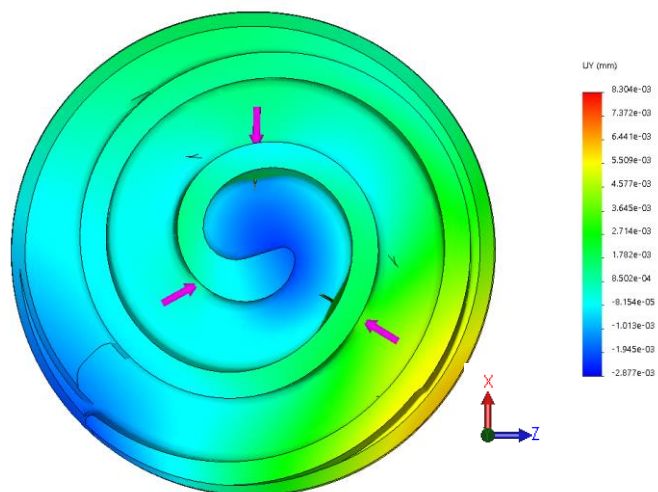
Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	2	1	1	2	2	5	8	6	3	3	11

- Rotação de 260°



Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	2	1	1	1	1	1	3	5	3	3	11

- Rotação de 290°



Pontos de Interesse	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	Máximo
Deslocamentos [μm]	1	2	1	1	1	1	1	2	5	3	8

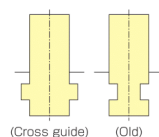
Anexo VIII – Especificações técnicas da bucha de aperto JN06 do fabricante *Kitagawa*.

**CHUCK****Scroll Chuck with Integrated Jaw (Straight Recess)****SC·JN series**

Durable, reliable and versatile KITAGAWA'S standard type

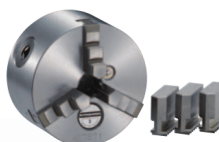
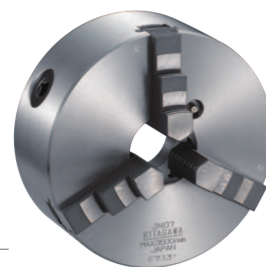
- Straight Recess
- Single Piece Jaw Type
Available with hard jaw for internal and external gripping.
- Steel body
Body is manufactured from high quality steel to increase rigidity, durability and rotational speed.

(SC-3, 4, 5, 14, 16 are made of cast iron,
and JN-6, 7, 9, 10 and 12 are made of steel.)



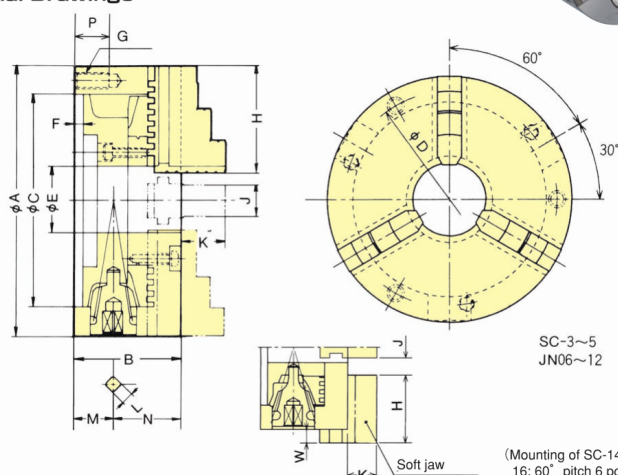
(Cross guide)

(Old)



SC-F Type

Dimensional Drawings

SC-3~5
JN06~12

(Mounting of SC-14,
16: 60° pitch 6 pcs.)

Dimensions

Type	Size	A	B	C (H6)	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	W max.	W min.
SC-3(F)	85	45	60	73	16	3.5	3-M 6	35	11	15	7	17	28	13	(1.5)	(- 7)	
SC-4(F)	110	58	80	95	24	4.5	3-M 8	42	14	18	8	24.5	33.5	16	(2.5)	(-12)	
SC-5(F)	130	60	100	115	32	4.5	3-M 8	50	16	20	8	22.5	37.5	16	(3.5)	(-14.5)	
JN06	165	65	130	147	45	5	3-M10	66	20.5	27	10	24	41	20			
JN07	190	75	155	172	55	5	3-M10	78	22.5	31	11	27.5	47.5	20			
JN09	232	84	190	210	70	6	3-M12	88	26.5	33	12	29.5	54.5	23			
JN10	273	86	230	250	85	6	3-M12	98	26.5	37	12	31.5	54.5	23			
JN12	310	96	260	285	96	7	3-M12	113	30.5	44	14	31.5	64.5	25			
SC-14	355	110	300	328	100	7	6-M12	132	35	52	15	38	72	35			
SC-16	405	120	345	375	110	8	6-M12	146	40	58	15	43.5	76.5	35			

Specifications

Type	Spec. Thru-Hole mm	Max. static gripping force kN(kgf)	Max. speed min ⁻¹	Weight (with standard jaws) kg	Moment of inertia kg·m ²	Gripping range Outer dia. mm Inner dia. mm	Handle torque N·m(kgf·m)
SC-3(F)	16	9.0 (918)	2500	1.5	0.001	2~ 70 24~ 64	29.4 (3.0)
SC-4(F)	24	12.0 (1224)	2500	3.1	0.004	3~ 95 29~ 84	44.1 (4.5)
SC-5(F)	32	15.0 (1530)	2500	4.4	0.009	3~110 33~100	63.7 (6.5)
JN06	45	31.0 (3161)	4000	8.4	0.030	3~160 48~150	88.2 (9.0)
JN07	55	31.0 (3161)	3500	12.2	0.060	4~180 56~170	107.9 (11.0)

*SC type and JN type, each one set of internal jaws and external jaws are attached as standard. Soft jaws cannot be used for JN type. SC-F type, each one set of internal jaws, external jaws and soft jaws are attached as standard. *When the soft jaws are used for SC-F type, use the chuck of lower specification.

*Since there are types mounted to the front side, please contact your agent if required.

Anexo IX – Perfil de indentação medido na bucha de aperto manual, modelo JN06 da *Kitagawa*.

